10 STABILITÀ DEI VERSANTI IN EROSIONE CON TECNICHE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

10.1 La stabilità dei versanti in erosione

Per la conoscenza della stabilità di un pendio risulta fondamentale la storia geologica regionale e locale dell'area in esame.
La conoscenza di diversi aspetti geologici nell'area d'indagine, tra cui la tettonica, la litologia, la presenza di lineazioni tettoniche a piccola e ad ampia scala, unitamente a studi di carattere geomorfologico (foto aeree e rilievi di campagna), permettono di individuare sulla superficie topografica le zone soggette a franamenti e a fenomeni di instabilità, diffusa o concentrata. Sulla base di questi elementi, vengono individuate le "aree in frana", ed è possibile ottenere un'indicazione sulla loro storia, distinguendo (Sacchetti, Ghinelli, 2000):

- *paleofrane*, fenomeni franosi sviluppatisi in condizioni climatiche e morfologiche diverse dalle attuali;
- *frane quiescienti*, fenomeni franosi mobilitati in condizioni morfologiche e climatiche, simili alle attuali, ma che oggi sono in apparente stato di stabilità. Il movimento può riprodursi in occasione di sensibili variazioni morfologiche e per eventi climatici anomali o per sollecitazioni transitorie, quali il sisma;
- *frane attuali* (o *in atto*), cioè quelle mobilitate in condizioni morfologiche e climatiche attuali.

Il termine "frana" è generico, in quanto si intende un movimento di massa di roccia o di terreno che avviene per gravità verso il basso. Le cause scatenanti sono molteplici e dipendono da fattori interni ed esterni al fenomeno.
Si hanno così differenti tipologie di frane, come quelle indicate nella classificazione di Varnes (1958, 1978): questa classificazione fa riferimento in generale a tutti i movimenti franosi di versante, includendovi anche quei fenomeni che non sono frane in senso stretto, quali le deformazioni estremamente lente e a carattere superficiale (Panizza, 1992). La classificazione di Varnes si articola, sulla base del tipo di movimento, in cinque classi principali:

- *crolli*;
- *ribaltamenti*;
- *scivolamenti* (rotazionali e traslativi);
- *espansioni laterali* e *colate*;

oltre alla classe dei *fenomeni complessi* (successione di più tipologie franose, in un unico evento di mobilitazione).
Le analisi necessarie per affrontare correttamente uno studio di stabilità dei pendii, si devono sviluppare attraverso le seguenti fasi (Sacchetti, Ghinelli, 2000):

- *studio geologico*: comprende il rilievo geologico inquadrato anche nel più ampio ambito regionale;
- *studio geomorfologico*: individuazione dell'area in frana con delimitazione della stessa. Per effetture questo studio occorre disporre del rilievo topografico del pendio, di estensione e scala opportune. La delimitazione planimetrica del corpo di frana viene generalmente svolta con:
  - rilievo geomorfologico: vengono cartografati i segni lasciati sul terreno, come fratture, nicchie, zone in contropendenza, ecc. Il rilievo a terra viene integrato dall'esame delle foto aeree;
  - rilievo di spostamenti superficiali con misure topografiche;
  - individuazione dello spessore del corpo di frana. Effettuato con motodi diretti ed indiretti come il rilievo di spostamenti orizzontali di punti mediante inclinometri; rilievo della dinamica delle fratture o distacchi presenti sulla superficie topografica per mezzo di estensimetri; rilievo della superficie di rottura mediante tubi spia o, ancora, individuando superfici di discontinuità sulla base dei caratteri strutturali, fisico-meccanici e strutturali dei terreni;
- *caratterizzazione del corpo in frana*: identificazione dei terreni; individuazione della stratigrafia; determinazione dei caratteri strutturali e delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni. In questo ambito è importante osservare che:
  - il volume e lo spessore del materiale mobilitato va precisato nel corso delle indagini;
  - il volume in questione spesso raggiunge profondità rilevanti, per cui la conoscenza della geologia della zona è indispensabile;
  - un volume di frana con spessore ridotto, può essere individuato tramite pozzi o piccoli scavi che consentano un esame visivo dei terreni;
- *analisi del regime idraulico all'interno del corpo di frana prima e dopo l'evento*: la presenza di falde idriche nel corpo di frana ha un ruolo fondamentale sulla stabilità del pendio. Il numero di punti di misura aumenta con il numero delle falde presenti nel terreno (in quanto questo può presentarsi disomogeneo. Spesso non si dispone di rilievi sulla falda all'atto del movimento franoso, il che influenza la deduzione della resistenza mobilitata e quindi i parametri di resistenza del terreno posti alla base di un eventuale progetto;
- *studio della cinematica del fenomeno franoso e classificazione del tipo di movimento franoso*, al fine di scegliere e progettare gli in-

terventi più appropriati per la stabilizzazione degli stessi;
- *modellizzazione del fenomeno franoso*: sintesi dei punti precedenti e schematizzazione degli stessi in termini tali da consentire l'analisi matematica del fenomeno stesso;
- *verifica della stabilità* per accertare che il modello proposto sia congruente con la realtà e per la messa a punto di un procedimento di calcolo da utilizzare successivamente nella progettazione dell'intervento di stabilizzazione.

10.2 I processi erosivi

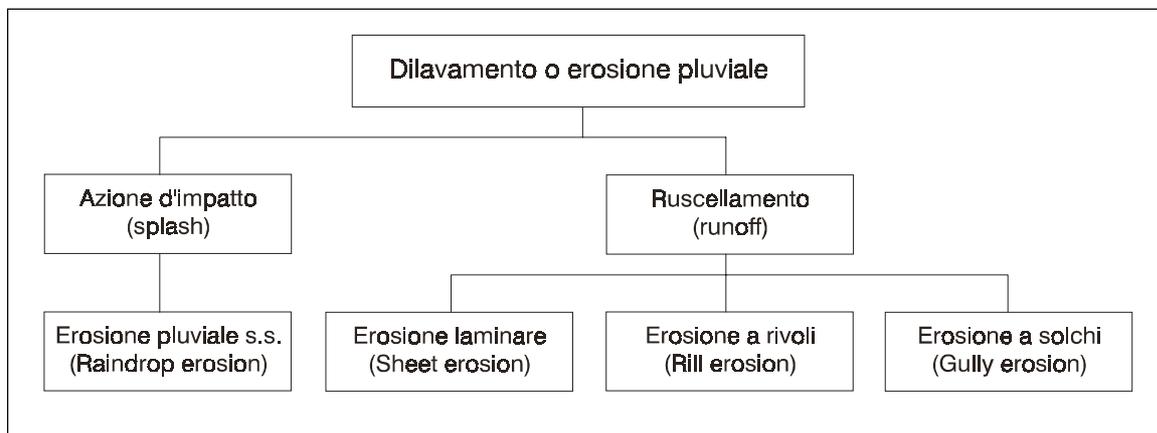
Si ritiene opportuno precisare che con il termine "erosione" si intende l'insieme dei processi di disgregazione e alterazione della superficie terrestre indicati con il termine generico di "erosione geologica", che si manifestano, in particolare, quando una roccia si trova in un ambiente diverso da quello in cui si è formata. L'atmosfera, l'idrosfera o la biosfera hanno una notevole influenza sulle modificazioni della superficie terrestre; in particolare possiamo definire come "degradazione meteorica" l'insieme dei fenomeni legati all'atmosfera che determinano la disgregazione delle rocce superficiali e dei materiali incoerenti (suolo, depositi alluvionali, detrito di versante), con conseguente frazionamento o soluzione per quanto riguarda le prime e alterazione o rigonfiamento dei secondi, in presenza, ad esempio, di minerali argillosi (Panizza, 1992). Questi processi si manifestano perché la roccia o i terreni subiscono:
- *alterazione chimica*: trasformazione chimica dei componenti costituenti la roccia o il terreno e formatisi in condizioni di temperatura e pressione diverse rispetto al momento dell'alterazione. I processi che intervengono modificano la struttura chimica e, di conseguenza, muta il comportamento dei "nuovi minerali" ai diversi agenti atmosferici (l'acqua, il vento, la variazione di temperatura e di salinità);
- *degradazione fisica*: fessurazione e frantumazione meccanica delle rocce coerenti ed incoerenti in "clasti", per opera di agenti modellanti come acqua, vento, ghiaccio e influenzati da parametri fisici quali la gravità e la temperatura.

L'azione erosiva delle acque correnti superficiali sono uno degli agenti del modellamento più importanti, in quanto hanno una duplice azione, ovvero contemporaneamente chimica e meccanica.

L'acqua può provenire sia dalle precipitazioni dirette (meteoriche) sia derivare dalla fusione delle nevi nelle zone glaciali. La sua azione si sviluppa con processi diversi e diverse sono le forme di erosione che ritroviamo in un paesaggio; basti osservare come, dopo un lungo periodo di siccità, un acquazzone improvviso "scolpisca" i versanti montuosi o come le gocce di pioggia, cadendo sul terreno secco e privo di vegetazione, rimuovano le particelle fini, facendole schizzare in varie direzioni (pioggia fossile). Questi semplici comportamenti, in realtà, sono alla base di una serie ben più complessa di processi geomorfologici, che producono forme molto particolari ed importanti.

Le acque piovane, prima di raccogliersi in corsi d'acqua, possono scorrere liberamente sulla superficie e, a seconda della loro intensità e del tipo di copertura vegetale, producono diversi processi erosivi: la parte di acqua che non evapora nell'atmosfera o non s'infiltra nel terreno, può scorrere lungo i pendii e dar luogo a fenomeni di dilavamento (**fig. 10.1**).

L'erosione pluviale o dilavamento consiste nell'azione meccanica prodotta dall'azione dell'impatto delle gocce di pioggia (effetto *splash*); essa rimuove le particelle più fini del terreno con la conseguente distruzione della struttura dei suoli o impoverimento delle sue sostanze organiche. Gli elementi che lo compongono possono essere allontanati e spinti verso valle lungo un versante, provocandone così la destabilizzazione. Questo è un altro importante e pericoloso processo di erosione che interessa i versanti prospicienti un corso d'acqua: il detrito che scende a valle lungo il versante aumenta il trasporto solido nel bacino interessato crean-

Fig. 10.1 - *Schema riassuntivo dei principali processi di erosione sui terreni*

Fonte: Panizza, 1992, modificato da Balboni, 2002.

do instabilità, franamenti, scoscendimenti ed asportando la parte di terreno fertile per la crescita e lo sviluppo della vegetazione, che impoveriscono il suolo e lo convogliano verso processi di desertificazione e a strutture erosive come quelle calanchive. In caso di terreni permeabili, invece, l'acqua penetra nel sottosuolo e alimenta la falda innalzandola e provocando, nel caso di strati argillosi, pericolosi rigonfiamenti e destabilizzazione.
Le acque piovane che scorrono in superficie inizialmente in modo diffuso, tendono poi, soprattutto se il terreno è ruvido, a concentrarsi in una fitta rete di filetti d'acqua.
L'acqua provoca un'erosione con energie diverse a seconda dell'acclività del pendio sul quale scorre e degli attriti del terreno; ovviamente più il pendio è acclive, maggiore sarà l'erosione prodotta (ovviamente se la vegetazione è poco presente), perché più elevata è la velocità su forti pendenze.
Il ruscellamento laminare (*sheet erosion*) può evolvere in erosione a rivoli (*rill erosion*), con il crescere delle portate di pioggia e con l'approfondimento graduale delle incisioni, provocate dallo scorrere dell'acqua. Quando questi rivi si allungano ulteriormente lungo il versante e si ramificano con un progressivo arretramento del versante, si realizzano un insieme di fossi (*gully erosion*) che danno luogo al caratteristico paesaggio dei calanchi, tipico dell'Appennino: appaiono su terreni argillosi e privi di vegetazione. Nel caso di deboli pendenze si realizzeranno invece fenomeni di soliflusso.
In sedimenti argillosi-sabbiosi poco coerenti inglobanti massi sparsi (come nei terreni morenici), si possono formare delle strutture prodotte sempre dall'azione delle acque meteoriche, chiamate piramidi di terra. Si formano quando la massa sabbiosa viene asportata dalle piogge e dalle acque, mentre rimane il masso che protegge la parte di materiale sottostante. Le piramidi d'erosione sono invece guglie e pinnacoli intagliati in rocce eruttive, in calcari, in dolomie, in arenarie, ad opera delle acque dilavanti e della degradazione meteorica, che agisce lungo le fratture verticali allargandole.

10.3 L'Ingegneria Naturalistica nella sistemazione dei versanti

Per risolvere, almeno in parte, i problemi d'instabilità dei versanti, si può agire con tecniche puntuali di sistemazione, che utilizzano materiali biodegradabili più o meno durevoli e vegetazione e che permettano un consolidamento in profondità del terreno in frana (aumento della resistenza al taglio, riduzione dell'acqua nel terreno e delle pressioni neutre), senza deturpare l'ambiente e l'equilibrio naturale del territorio. Gli interventi di sistemazione con tecniche di Ingegneria Naturalistica determinano un ridotto impatto sul territorio, apportandovi, spesso, un miglioramento, sia dal punto di vista estetico-paesaggistico, che faunistico.
Tecniche spesso usate in questi casi sono:
- semine e idrosemine;
- piantagioni di talee o piantine;
- viminate e fascinate vive;
- gradonata viva;
- grata viva;
- palificata viva di sostegno, semplice e a parete doppia;
- gabbionate vive;
- terre rinforzate;
- materassi rinverditi;
- rivestimenti vegetativi.

L'instabilità dei versanti, come si può leggere nei diversi esempi citati nel paragrafo precedente, non è conseguenza di un solo processo, ma è assai più complessa, e diverse sono le sistemazioni che si devono prevedere.
Le sistemazioni con tecniche di Ingegneria Naturalistica possono sostituire solo in determinate condizioni, fisiche ed ambientali, quelle classiche. In casi, ad esempio, di modesti spazi a disposizione, di caratteristiche climatiche estreme o di protezione civile, s'intervene generalmente seguendo gli schemi dell'ingegneria classica. L'Ingegneria Naturalistica si distingue nettamente da quella tradizionale in quanto utilizza piante vive per stabilizzare le scarpate. Mentre nelle opere tradizionali la trincea o il rilevato vengono consolidati mediante muri di sostegno (Zeh, 1995), in quelle con l'impiego dell'Ingegneria

Tab. 10.1 - *Vantaggi e svantaggi delle opere di Ingegneria Naturalistica*

Vantaggi delle opere di Ingegneria Naturalistica	Svantaggi delle opere di Ingegneria Naturalistica
Deformabilità delle opere e capacità di rigenerare parti danneggiate.	Minor scelta tra i materiali, che spesso non sono ben caratterizzati (ad esempio, piante).
Migliore capacità di adattamento ai cambiamenti ambientali.	Parametri progettuali meno precisi e procedure costruttive non ancora standardizzate.
Minor impatto ambientale, spesso miglioramento della qualità ambientale.	Tempi più lunghi per entrare in piena funzionalità.
Spesso maggior economicità e miglior bilancio energetico.	Limiti tecnici, biologici e temporali; maggiore influenza dei fattori ambientali.
Funzionalità ed efficienza crescente nel tempo e corretto inserimento paesaggistico.	Manutenzione regolare e protratta per alcuni anni dall'esecuzione, anche se con intensità decrescente.

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, 2000, modificata da Palmeri, 2002.

Tab. 10.2 - *Basi normative per l'impiego di pareti a gravità*

Fattori	**Opere tradizionali**	**Opere di Ingegneria Naturalistica**
Materiali	Legno, calcestruzzo, laterizi terra e cemento armato	Terra e piante vive
	Caratteristiche: fissate da direttive, norme, ecc.	Caratteristiche del terreno: in base alle direttive, norme. Caratteristiche delle radici: **direttive inesistenti**
Tipo di manufatto	Stab. dimens. esterna: in base a direttive, norme Stab. dimens. interna: in base a direttive, norme	Stab. dimens. esterna: in base a direttive, norme Stab. dimens. interna: **direttive e norme inesistenti**
Variabili	Varie	Piante, aria, acqua, luce, manutenzione, utilizzo, clima, età, concorrenza....
	Ininfluenti	**Molto influenti**
Procedure tecniche	Disponibili	**Inesistenti**, esperienze limitate
Impiegabilità	Dimostrabile in base a norme	**Va convocata di caso in caso da un tecnico**

Fonte: Hoffman, 1992.

Naturalistica, si cerca di creare un ambiente armonico, combinando materiali inerti e piante, ottenendo un manufatto permeabile e drenante. Nella **tabella 10.1** si raffrontano le caratteristiche positive e negative delle opere di Ingegneria Naturalistica rispetto a quelle tradizionali.
Nella **tabella 10.2** vengono evidenziate le diverse basi normative per l'adozione di un muro a gravità di tipo tradizionale o naturalistico. Il secondo termine presuppone che l'opera non possa esistere senza piante vive; di conseguenza le piante devono presentare caratteristiche biotecniche ben precise (si pensi ad un manufatto costituito dalla massa terrosa irradicata di una scarpata consolidata con file di cespugli, ovvero gradonate vive; cfr. Hoffmann, 1992). L'opera tradizionale è realizzata solo con materiali inerti, quali legname morto, calcestruzzo, laterizi, ecc. eventualmente assieme ad un corpo terroso.
In entrambi i casi, per dimostrare la validità della scelta fatta, occorre dimostrare la stabilità dimensionale sia interna che esterna. I manufatti tradizionali possono dimensionarsi esattamente (sia per la stabilità interna che per quella esterna) in base a prescrizioni e norme già esistenti; per il manufatto di tipo naturalistico, invece, soltanto il calcolo della stabilità dimensionale esterna è effettuato in base a determinate normative, mentre solo poche esperienze di studi precedenti vengono finora in aiuto per il calcolo della stabilità dimensionale interna (senza dimenticare che a causa dell'alto numero di variabili anche queste esperienze sono difficilmente applicabili a situazioni diverse da quella originale; cfr. Hoffmann, 1992).
Per una previsione e una verifica delle reali possibilità delle piante in questo senso, si rendono, quindi, necessarie ben più vaste conoscenze da parte degli esperti, soprattutto in relazione alle caratteristiche biotecniche delle piante impiegate.
La scelta delle piante costituisce la componente d'impiego più importante per avere la garanzia di una completa rinaturalizzazione delle stazioni, sia che si tratti di versanti in frana, di corsi d'acqua o di discariche.
La scelta delle specie deve essere, quindi, oculata e deve procedere di pari passo con la conoscenza delle caratteristiche climatiche, geologiche ed ecologiche dei siti d'intervento. In questo contesto le diverse figure professionali si attivano simultaneamente analizzando i caratteri pedologici, geomorfologici, geotecnici, ecologici e botanici delle specie forestali delle aree di interesse (De Colle, Mocchiutti, 2000).
Lo studio di dettaglio delle condizioni geostatiche ed idrogeologiche diviene una premessa fondamentale per la buona riuscita degli interventi; una prima analisi è quella che viene effettuata sotto un profilo geotecnico e chimico e permette di individuare le cause dei dissesti e la natura del terreno.
Nel ripristino dei versanti in frana è necessario conoscere con precisione la profondità delle superfici di scorrimento e quindi valutare l'applicabilità degli interventi con le tecniche di Ingegneria Naturalistica.
Fondamentale diviene la realizzazione di opere di captazione e drenaggio delle acque, soprattutto per la sistemazione di numerose piccole frane in terreni argillosi ed in zone contraddistinte da depositi morenici o substrati flyschioidi.
Nelle aree collinari caratterizzate dalla presenza del *flysch* la maggior parte delle frane sono di tipo superficiale ed i piani di scivolamento si sviluppano al contatto tra la roccia sana ed il cappellaccio di alterazione in corrispondenza di venute d'acqua anche temporanee o per modificazione antropica del versante (De Colle, Mocchiutti , 2000).
Gli interventi di Ingegneria Naturalistica posso-

no essere raggruppati, secondo Schiechtl (1990), Carbonari e Mezzanotte (1993) nei seguenti insiemi:

- *interventi di copertura* (*rivestimento*): sono interventi spesso integrati da interventi stabilizzanti; consistono nella semina di specie erbacee per proteggere i versanti dall'erosione, per migliorare il bilancio termo-igrometrico al suolo e le caratteristiche fisico-chimiche del terreno; la profondità delle radici in alcune specie erbacee impiegate può superare i 2 m;
- *interventi di stabilizzazione del suolo* (*sistemazioni stabilizzanti*): sono operazioni di consolidamento tramite l'azione legante degli apparati radicali e la sottrazione dell'acqua mediante traspirazione, per una profondità massima di circa 3,5 m;
- *interventi di sostegno* (*combinati*): queste operazioni sono effettuate per dare sostegno al versante, soprattutto in corrispondenza della corona, nei tratti a forte pendenza, al piede del versante stesso; vengono impiegati materiali da costruzione vivi combinati con quelli inerti;
- *interventi di completamento* (*complementari*): sono interventi di semina e piantagione di specie legnose con lo scopo di accelerare la successione naturale verso lo stadio seriale desiderato; possono essere immediatamente consecutivi ad altri interventi o seguirli di alcuni anni;
- *opere di regimazione idraulica*: con queste opere si allontanano le acque superficiali e profonde dall'area in dissesto, per evitare che le acque, fluendo, possano interferire con le operazioni di ripristino; si costruiranno quindi collettori naturali o artificiali per lo scopo.

Per capire con quali tecniche di Ingegneria Naturalistica intervenire, si possono suggerire due metodologie:

Tab. 10.3 - *Schema contenente l'elenco delle opere ordinato dipendentemente dalla pendenza rilevata*

Inclinazione scarpata	Tipo di intervento
10°<x<15°	Non intervento
15°<x<25°/27°	Semine • manuali • potenziate • a spessore Idrosemine • potenziate • a spessore Semine a paglia e bitume (le semine possono essere di specie erbacee/arbustive/arboree o di 2 o 3 classi)
25°<x<35°/37°	Biostuoie (stuoie, reti, griglie) Stuoie in materiale sintetico (stuoie, reti, griglie)
35°<x<45°	Fascinata vive Gradonata viva con talee e latifoglie radicate Cordonate vive Ribalta viva Palificata viva di sostegno a parte semplice o doppia Materasso rinverdito con piantagione di piantine radicate o talee Geocelle a nido d'ape in materiale biodegradabile e sintetico
45°<x<55°	Geocelle a nido d'ape in materiale biodegradabile e sintetico Materasso rinverdito Grata viva
55°<x<65°	Gabbionata rinverdita • Terra rinforzata • Balze in geotessuto • Terre rinforzate con paramento in geogriglia o geotessuto e rete metallica • Terre rinforzate con gabbioni • Terra armata Rivestimento vegetativo (anche con talee e piantine)
65° <x<80° — Solo con impianto di irrigazione }	Rivestimento vegetativo (anche con talee e piantine) Terra rinforzata (anche con talee e piantine) Terra armata (anche con talee e piantine)

Fonte: Palmeri, 2002.

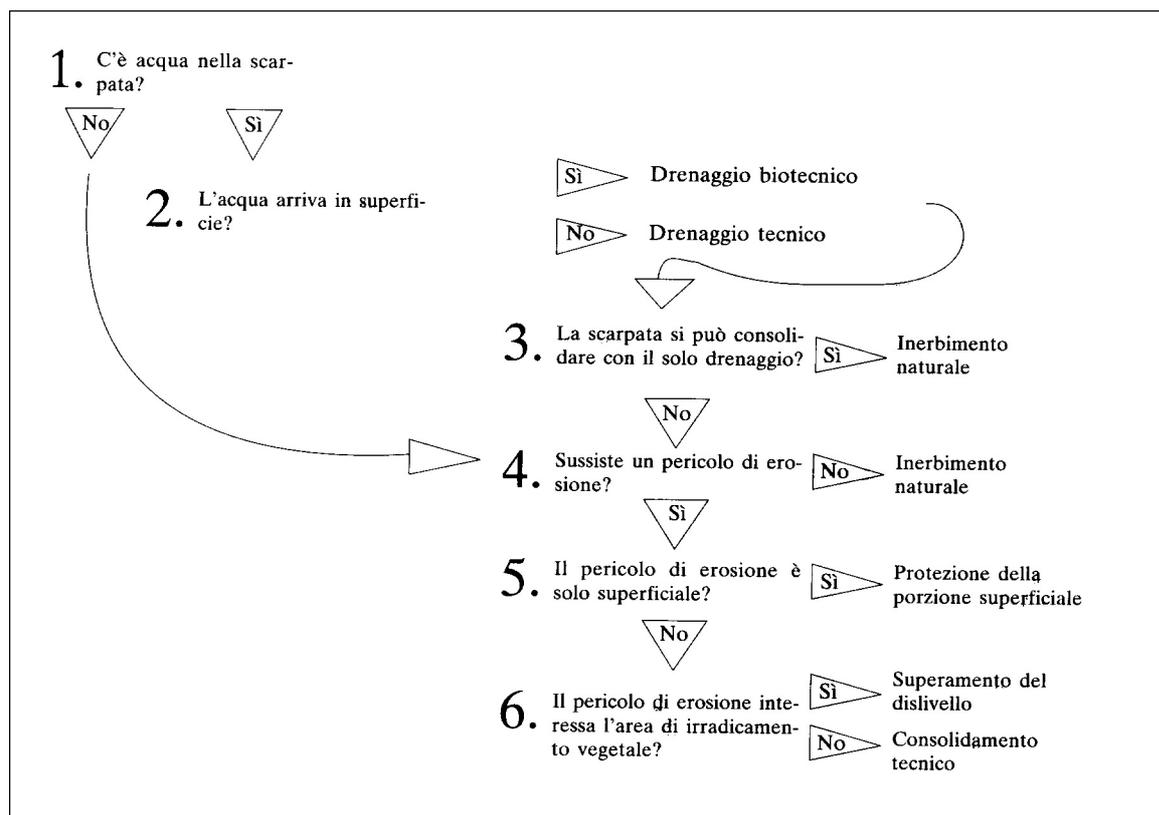
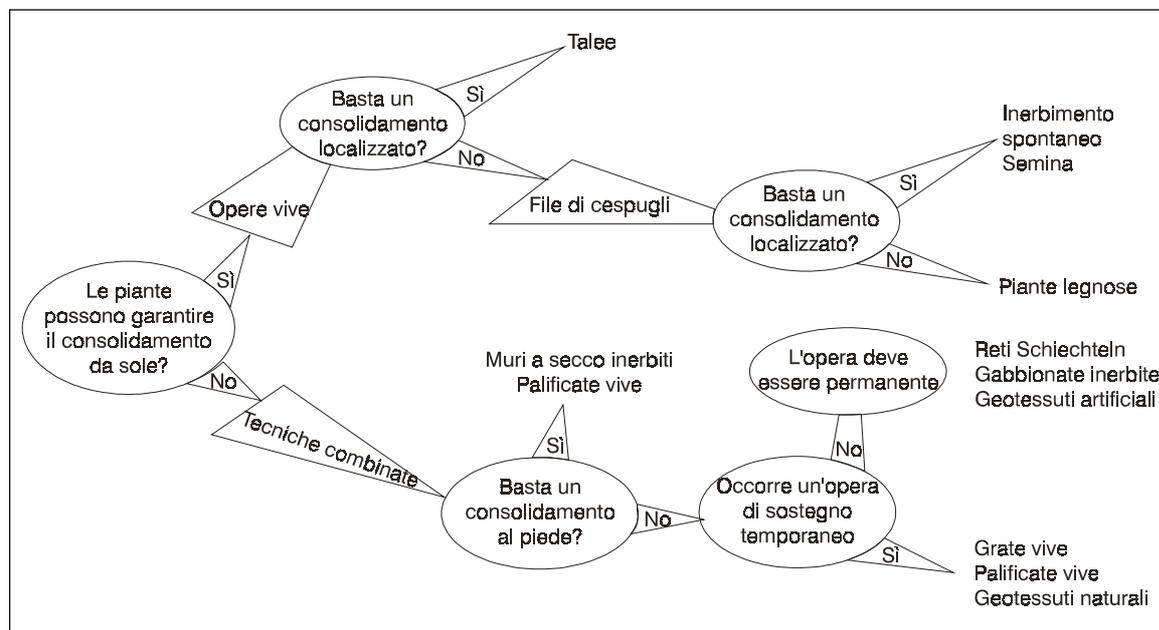
Fig. 10.2 - *Sei domande per individuare la tecnica di Ingegneria Naturalistica più diffusa*

Fonte: Zeh, 1992.

Fig. 10.3 - *Superamento del dislivello*

Fonte: Zeh, 1992.

- con la prima (Palmeri, 2000) l'inclinazione della scarpata è il fattore maggiormente condizionante la scelta delle tipologie (**tab. 10.3**);
- nella seconda (Zeh, 1992) viene proposto, tramite un percorso logico di domande, uno schema risolutivo (**fig.10.2**).

Per capire con quali opere intervenire ci si pongono, appunto, sei domande: partendo dalla prima ("C'è acqua nella scarpata?") si può passare direttamente alla quarta domanda, nel caso la risposta sia negativa; se la risposta è positiva, invece, si segue con il punto 2 ("L'acqua arriva

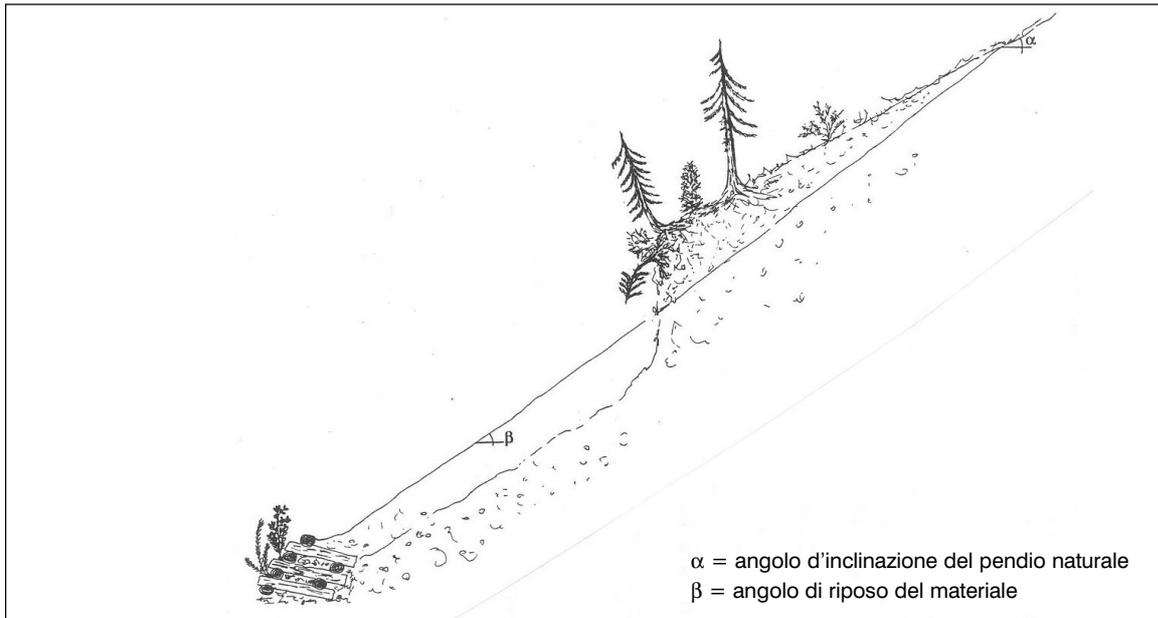
in superficie?”). Se la risposta è “sì”, occorre realizzare un drenaggio di tipo biotecnico come, ad esempio:
- fossi pavimentati con zolle erbose;
- fossi pavimentati con zolle erbose e pietre;
- canalette inerbite a fondo scabroso;
- canalette con stangame vivo;
- drenaggi con arbusti;
- drenaggi combinati con fascine;
- drenaggi con stangame.

Seguendo un percorso logico si giunge così al tipo di soluzione da impiegare in caso di stabilizzazione di scarpate.
Le domande poi seguono fino alla sesta, tra le cui risposte si propone quella del superamento di dislivello con opere di Ingegneria Naturalistica: infatti, per motivi di spazio, le scarpate presentano spesso una pendenza eccessivamente ripida. Per stabilizzare scarpate del genere occorre quindi realizzare ulteriori opere di consolidamento (**fig. 10.3**):
Di norma, nella sistemazione dei versanti si procede tramite le seguenti operazioni, secondo determinati gruppi logici di classificazione:

- *Opere accessorie preventive:*
  - tra i primi interventi è necessaria una bonifica dell’area d’intervento al fine di garantire l’accesso al cantiere per effettuare i primi disgaggi, l’abbattimento delle piante instabili, la collocazione di reti paramassi;
  - recinzione dell’area di cantiere tramite barriere invalicabili (zone densamente popolate) o tramite nastro plastico a bande bianche e rosse, con apposita segnaletica (divieto d’accesso, pericolo, ecc.) e, comunque, quella prevista dalla normativa sulla sicurezza nei cantieri;
  - allestimento di eventuali aree di scarico dei materiali, delle zone di stoccaggio, dei macchinari e dei generatori elettrici per il funzionamento dell’impianto elettrico di cantiere;
  - messa in opera di sistemazioni idrauliche provvisorie, per eliminare, ad esempio, l’afflusso dall’alto di acque superficiali sul corpo di frana;
  - predisposizione di adeguati siti per i depositi di carburante ed olii;
  - predisposizione di eventuali aree destinate alla teleferica o al carico del cestello per elicottero.
- *Messa in sicurezza dell’area da corpi instabili o instabilizzanti:*
  - disgaggio e/o ancoraggio degli ammassi rocciosi instabili dai pendi;
  - abbattimento e asportazione totale delle piante arboree dal versante in frana e lungo la corona, per una fascia di altezza variabile (comunque non inferiore ai 10 m) in funzione dell’altezza e dell’inclinazione della corona, dell’inclinazione del pendio soprastante, dei parametri geotecnici del terreno e delle caratteristiche della vegetazione;
  - alleggerimento della vegetazione arborea nelle restanti porzioni di versante soggetto ad instabilità, con le precauzioni descritte nel capitolo relativo ai corsi d’acqua.
- *Sistemi di fossi di guardia:*
  - nella sistemazione dei versanti si deve provvedere ad allontanare, dall’area in cui si deve intervenire per il ripristino, le acque superficiali o d’infiltrazione: si realizzerà, quindi, un fosso di guardia a monte e lateralmente al dissesto. Le opere di drenaggio possono essere, per esempio, fossi pavimentati con zolle e/o pietre, canalette inerbite a fondo scabroso, drenaggi con arbusti e drenaggi combinati con fascine;
- *Accantonamento del terreno vegetale delle zolle di cotico e altro materiale vegetale:*
  - data, in alcuni casi, la difficoltà dei mezzi di trasporto ad allontanare il materiale “di risulta”, si potrà accantonare il terreno vegetale presente nell’area delimitata dai lavori, per poterlo riutilizzare al momento opportuno;
  - anche la difficoltà di reperimento del materiale vegetale utile non è sempre facile ed immediato: si consiglia, a tale proposito di mantenere con cura il materiale necessario, se presente nell’area oggetto di lavorazione, ad esempio:
    - § le zolle erbose vanno conservate in mucchi d’altezza non superiore a 0,6 m e lunghezza non superiore a 1 m, periodicamente bagnate e tenute all’ombra ed al riparo dal vento;
    - § le piante possono essere conservate, durante il periodo di riposo vegetativo, in tagliola o coperto da ramaglia morta, proteggendole dall’essiccazione, dal riscaldamento e dal vento. Durante il periodo vegetativo, invece, si conservano in acqua corrente con profondità superiore a 20 cm e temperatura inferiore a 15° C.

  Dove è possibile, si consiglia di conservare i lembi di vegetazione che non necessitano di essere sradicati e che si trovano su porzioni di versante stabili, in quanto possono probabilmente ricacciare e conferire al versante stesso maggiore stabilità.
- *Modellamento morfologico:*
  - una delle prime operazioni da compiere per la messa in sicurezza di tutta l’area di intervento è la sistemazione della corona (*cigliatura*), tramite la quale si raccorderà il terreno posto al di sopra dell’area in dissesto con la base del pendio, favorendo un profilo compatibile, privo di brusche e pericolose rotture di pendio. Secondo Schiechtl e Stern (1992), il raggio dell’arco di raccordo tra il terreno in posto e il corpo di frana deve essere superiore a 5 m. Insieme all’operazione di scoronamento è consigliabile prevedere, al fine di ottenere un’ulteriore stabilizzazione del pendio, un’opera di sostegno al piede (scogliere, palificate vive di sostegno, gabbionate rinverdite), accumulando a tergo di essa il materiale in eccesso soprastante (**fig. 10.4**). Il materiale alla base dovrà essere compattato a strati successivi che permettano un facile drenaggio delle acque e il rinverdimento;

Fig. 10.4 - *Profilo di versante illustrante il rapporto tra gli scavi e i riporti di terreno*

α = angolo d'inclinazione del pendio naturale
β = angolo di riposo del materiale

Fonte: Carbonari, Mezzanotte, 1992 (modificato).

- un'altra importante operazione è la profilatura (compensazioni scavi-riporti), con la quale si regolarizza il pendio mediante l'eliminazione di creste affilate o di porzioni di pendio particolarmente sporgenti, in funzione delle caratteristiche geomeccaniche del materiale. Il salto della corona viene annullato tramite l'apporto di materiale dall'alto ottenuto con uno scoronamento e quindi un arretramento della parte sommitale (Carbonari, Mezzanotte, 1993). La superficie da rinverdire aumenta, così, notevolmente.
  Questo caso si presenta frequentemente in lavori di modellamento di versanti, ma è anche tra i più complessi, in quanto il calcolo dell'arretramento deve essere finalizzato ad ottenere il materiale necessario per compensare quello mancante alla base. Lo scavo d'arretramento può essere effettuato a mano o con mezzi meccanici. Nel primo caso la quantità di materiale da movimentare non supera generalmente i 100 ÷ 200 m^3 o la zona è di difficile accesso; dove la lavorazione è, invece, più impegnativa, può essere utilizzato il ragno meccanico che raggiunge il sito qualora le condizioni orografiche impediscano la costruzione di una viabilità di servizio, in quanto questo mezzo può raggiungere il luogo di lavoro risalendo anche i pendii più ripidi e spostare volumi fino a 3.000 ÷ 4.000 m^3 (Carbonari, Mezzanotte, 1993). Infine, le opere di sostegno costruite al piede del versante, vengono interrate e raccordate con la restante pendice;
- al di sopra delle superfici riprofilate viene posto terreno vegetale, per migliorare le caratteristiche chimico-fisiche del suolo e per favorire l'attecchimento delle piante. Per evitare che vi siano problemi di radicazione entro lo strato minerale sottostante a quello vegetale, si devono riportare spessori di terreno vegetale superiore a 10 cm su pendii moderatamente acclivi, spessori fino a 10 ÷ 15 cm sui versanti di media inclinazione. Sui versanti ripidi ($\alpha >35°$) è escluso il riporto, ma è consigliata la miscelazione del terreno con quello già presente (terreno minerale) e l'impiego di specie pioniere.

• *Regimazione idraulica*: è prioritario regimare le acque superficiali tramite canalette, collettori e pozzetti, e le acque sotterranee con drenaggi subsuperficiali e/o profondi (ad esempio, canne drenanti); non si può garantire, infatti, l'ottimale riuscita di un intervento di ripristino se in corso d'opera non si considera come fattore destabilizzante principale l'azione erosiva dell'acqua. A tale riguardo possiamo possiamo distinguere (Carbonari, Mezzanotte, 1995):
- azione erosiva dovuta a precipitazioni meteoriche intense con scorrimenti laminari o incanalati, causa di danni superficiali;
- azione erosiva dovuta alla presenza di sorgive perenni o periodiche, messe a luce da crolli naturali o intercettazioni con falde sotterranee durante i lavori di modellamento.

Nel primo caso si può procedere con interventi di copertura, mentre nel secondo la situazione è più complessa e si può controllare con interventi radicali di regimazione idraulica, tra cui:
- *canalette di captazione in legno*: servono per raccogliere ed allontanare l'acqua superficiale, al fine di consentire alla vegeta-

zione di svilupparsi completamente senza che la scarpata sia in erosione. Sono costituite da tavole in legno di spessore 2 ÷ 4 cm, assemblati a "U" o a "V" e fissato al terreno con picchetti in legno o ferro;
- *trincea drenante con tubo forato e geotessile*: la struttura drenante è data da un geotessile sintetico composto da una struttura in nylon alveolare, interposto a due non tessuti in poliestere, per uno spessore complessivo di 2 cm; questa struttura viene posta a monte entro una trincea scavata alla profondità di 1 m, insieme a un tubo microforato, il tutto riempito con materiale presente in loco;
- *trincea drenante con fascinate morte e vive*: il metodo di drenaggio consiste nello scavo di un fosso profondo 80 ÷ 100 cm, riempito con fascine di ramaglia morta, fissate al terreno con picchetti di legno o di ferro; se l'azione di drenaggio è permanente, si possono usare ramaglie vive di salice che, a contatto con il terreno, emettono radici e formano così una linea drenante vegetata e stabile, disposta sia lungo la linea di massima pendenza del versante o diversamente inclinata. Queste piante consentono la captazione delle acque mediante la loro infiltrazione nel terreno;
- *drenaggio con tubo forato e fondo impermeabile*: questo metodo serve per migliorare la funzionalità del drenaggio con fascinate; il fondo del fosso viene rinforzato con guaine di plastica (PE) impermeabili oltre ad un tubo microforato in plastica, che aumenta la velocità di deflusso ed impedisce i ristagni di acqua.
- *drenaggio verticale combinato*: questa tecnica si applica nei casi di più venute d'acqua e con flussi a portata non importante, ma continua; si crea un bacino d'accumulo a valle del punto di affioramento idrico, costruito con sacchetti di juta riempiti di sabbia. Entro questo sbarramento viene costruito un pozzetto in calcestruzzo al quale convogliano da monte tubi in PVC forati, mentre in uscita si inserisce un altro tubo, per lo smaltimento dell'acqua a valle;
- *pozzetti filtranti in legno*: nei punti di ristagno idrico su versante, si costruiscono pozzi di captazione, costituiti da tavole in larice di spessore 4 ÷ 5 cm a forma di scatola, con un foro a monte come filtro ed uno a valle per inserire il tubo di scarico. Il pozzetto si interra coprendolo, però, con un coperchio per l'ispezione.

Effettuate tutte le operazioni preliminari di messa in sicurezza e riordino, si dovrà procedere con l'applicazione delle tecniche di Ingegneria Naturalistica, in funzione del particolare tipo di movimento gravitativo. Nel caso in cui, ad esempio, il problema sia localizzato al piede del versante (scalzamento del piede a causa di erosione, generalmente dovuta ad un corso d'acqua), si dovrà provvedere a difendere la base del versante (o della sponda) con opere come palificate, repellenti o briglie.
Secondo Puglisi (2000), dopo l'esecuzione dei lavori si rendono opportuni interventi di sistemazione a verde della superficie di versante in frana.
La copertura vegetale (arbustiva e/o arborea), svolge, infatti, un ruolo funzionale perché assolve due compiti che integrano sinergicamente l'effetto stabilizzante, sia delle opere strutturali che di quelle idrauliche (Puglisi, 2000). L'evapotraspirazione delle piante consente di ridurre le pressioni neutre entro il terreno e l'apparato radicale fornisce un incremento della resistenza al taglio del terreno stesso. Le piante impediscono l'azione erosiva, come si è detto più volte, e la formazione di scanalature; l'azione erosiva si esplica anche per effetto di protesi, ovvero di accorgimenti costruttivi che rendono possibile l'impiego della vegetazione. A causa di andamenti climatici sfavorevoli, la vegetazione può avere bisogno di un aiuto iniziale, consistente in una grande quantità d'acqua al momento propizio. Nelle frane stabilizzate vi è spesso la possibilità di attingere acqua, ad esempio dai pozzi drenanti, per cui sono da prevedere, quando possibile, piccoli impianti di irrigazione a goccia, inserendo i tubicini a monte di viminate, fascinate, gabbioni, ecc. Se si procede a semine occorre impedire che particelle di suolo migrino per l'azione di trascinamento delle acque di ruscellamento, scoprendo o asportando il seme, per cui si può ricorrere a tutte quelle forme che possiamo chiamare "protesi a scomparsa" (Puglisi, 2000).

10.4 I limiti dell'Ingegneria Naturalistica nelle opere su versante

Per quanto riguarda l'impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica su versante possiamo considerare in particolare, i seguenti limiti:
- *limiti operativi*: innanzitutto occorre impiegare manodopera che possieda il bagaglio operativo sia dell'operaio forestale che di quello edile, in quanto gli interventi su versante comprendono una serie di lavori che prevedono svariati materiali e macchine. Secondo Luchetta (1994), inoltre, gli interventi di Ingegneria Naturalistica necessitano di elevata presenza di manodopera. Le attrezzature necessarie in ambito di difesa di un versante sono macchine tipicamente forestali (trattore, motosega, gru con cavo), macchine edili (escavatore, betoniera, compressore, perforatrice), ma anche macchine speciali quali escavatore ragno ed elicottero;
- *limiti connessi alla necessità di manutenzione*: gli interventi di manutenzione, da compiersi per alcuni anni dopo l'intervento con intensità decrescente, sono tanto intensivi quanto più difficili sono le condizioni stazionali; il controllo regolare è indispensabile per non compromettere il buon esito di tutta l'operazione effettuata;

- *limiti connessi alla reperibilità dei materiali da costruzione vivi*: non sempre è facile reperire sul mercato i materiali adatti alla costruzione delle opere di Ingegneria Naturalistica (cfr. capitolo 7). In un recente lavoro (Cornelini, Sauli, 1991) è stato infatti affrontato il problema del mantenimento della diversità biotica (evitando interventi che portino a formazioni monospecifiche che determinino una bassa diversità specifica) negli interventi di rinaturalizzazione, con la proposta di individuare le specie idonee negli interventi sulle scarpate facendo riferimento all'analisi fitosociologica della vegetazione. Questo consente di riconoscere lo stadio dinamico di riferimento, in funzione delle caratteristiche ecologiche della stazione (morfologia, suolo, microclima, ecc.), data la difficoltà di reperire sementi di specie autoctone pioniere;
- *limiti connessi alla tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori*: i lavori che si compiono su versante comportano una serie di rischi legati, soprattutto alla morfologia del territorio, all'inclinazione del versante, alla presenza di salti in roccia, alla mancanza di un'agevole o percorribile via di comunicazione o di fuga in caso di evacuazione. Vero è che vi sono i "dispositivi di protezione individuale" (DPI) che sono obbligatori per le diverse condizioni di lavoro, escludendo i casi in cui è sufficiente una semina o idrosemina accompagnata da piantagioni, in quanto i primi rientrano nel campo d'applicazione del DLgs 494/1996 in materia di cantieri temporanei e mobili, così come modificato dal DLgs 528/1999, ma tali dispositivi risultano spesso insufficienti o inadeguati alle condizioni di lavoro.

10.4.1 Campo di applicazione delle opere di copertura

Il fine principale di questo tipo di intervento è quello di proteggere il suolo dall'erosione superficiale, dalle acque di dilavamento e dall'azione dei vari agenti meteorologici, ripristinando la copertura vegetale. Secondo Kuonen (1983), questo tipo di tecnica può essere utilizzata su scarpate con grado di sicurezza superiore a 1,1, come si può evidenziare nella **figura 10.5**, in cui:

η = grado di sicurezza.

è data da:

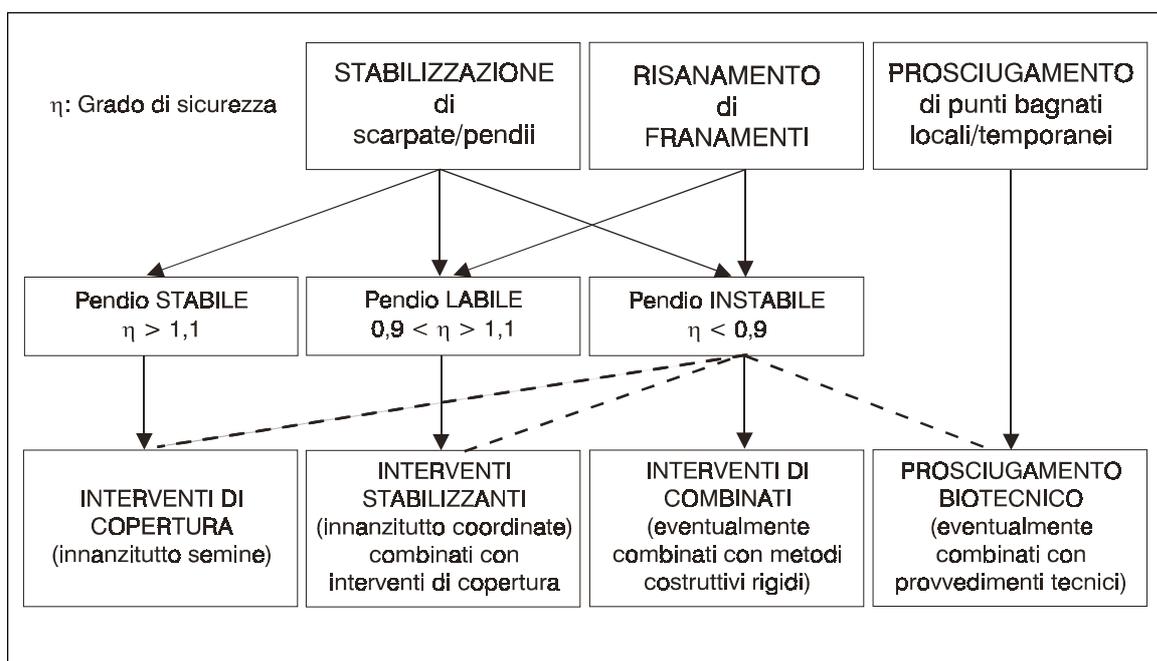
$$\eta = \frac{tg\phi}{tg\beta}$$

in cui :

ϕ = angolo d'attrito;
β = inclinazione del versante.

Si consiglia di utilizzare dei supporti, quali:
- idrosemina a spessore;
- sostanze pacciamanti;
- reti e stuoie biodegradabili;
- reti e stuoie in materiale sintetico;

che consentono la protezione immediata del suolo, in attesa che si affermi la vegetazione (i tempi naturali sono troppo lunghi per assicurare una protezione completa del suolo nelle prime fasi). Si vedano al riguardo le relative schede tecniche.
Le opere di copertura, accompagnate dalla regimazione delle acque, comprendono soprat-

Fig. 10.5 - *Stabilità delle scarpate e tipi d'intervento dell'Ingegneria Naturalistica*

Fonte: Kuonen, 1983.

tutto semine, da integrarsi con interventi lineari o a scacchiera.
La messa a dimora di zolle erbose o di prato in rotoli è consigliabile dove le piote sono state ricavate in seguito ad attività di cantiere come, ad esempio:
- scoronamenti;
- scavi per interramento di tubazioni;
- pista da sci.

Le soluzioni integrative alle semine possono essere:
- *palizzate e stecconate*, che si prestano bene su coltri detritiche a materiale grossolano;
- *graticciate*, che essendo più elastiche e flessibili, si adattano a versanti in materiale più fine; sono opere che però si degradano rapidamente, quindi devono essere previste dove la vegetazione non impieghi più di 1 ÷ 2 anni per insediarsi;
- *ramaglia morta*, in sostituzione delle opere sopra elencate, se disponibile sul cantiere. La costruzione può avvenire in allineamenti livellari continui o a scacchiera. Se la ramaglia è di conifere, i rami saranno disposti con la parte più spessa verso monte e appesantita da pietrame o fissata con picchetti; se la ramaglia è di latifoglie sarà sistemata in fascine fissate al suolo con picchetti;
- *coltre protettiva e bitume (sistema nero-verde)*: questa tecnica è limitata dal fenomeno di riscaldamento dello strato superficiale del suolo, dovuto al colore scuro del bitume, che potrebbe sfavorire lo sviluppo delle piantine e, pertanto, non è tecnica adatta ai climi caldi;
- *coltre di paglia o fieno con reti scure biodegradabili a maglie larghe o reti in fibra di juta o cocco*: è una soluzione migliore rispetto a quella soprastante, in quanto il legante è di colore chiaro e ciò non comporta i problemi di cui sopra.

In genere i miscugli utilizzati per le semine sono quasi esclusivamente specie erbacee ed in parte specie arbustive ed arboree. Si consiglia, inoltre, l'impiego di essenze legnose, soprattutto in caso di versanti ripidi, di difficile accesso o con estesa copertura rocciosa, ove sarebbe difficile tornare per effettuare interventi complementari (Schiechtl, 1995).
Nella **tabella 10.4** vengono riassunte le principali opere di copertura.
Tra gli interventi citati nella tabella ricordiamo che l'ultimo è adatto per situazioni a forte rischio di erosione ed in condizioni stazionali molto sfavorevoli (di conseguenza, è un intervento molto costoso).
La posa in opera di rete metallica zincata a doppia torsione associata a coltre protettiva o a reti in juta o cocco, è indicata nei cantieri in cui vi sia il rischio di movimenti gravitativi a seguito di processi di ristagno idrico o di inclinazioni elevate di versante (> 35°), o ancora nel caso di terreni vulnerabili posti a valle.

10.4.2 Campo d'applicazione per le opere di stabilizzazione

Le opere di stabilizzazione su versante sono costruzioni lineari che seguono l'andamento del-

Tab. 10.4 - *Principali opere di copertura*

Tecnica	Impiego	Inclinazione del versante (°)	Efficacia	Vantaggi	Svantaggi	Costo
Semine a spaglio	Versanti poco inclinanti, con materiale grossolano, terreni relativamente evoluti, microclima fresco, fenomeni erosivi scarsi; rinverdimenti temporanei.	<20°	Media	Semplicità; assenza d'attrezzature; conveniente anche per piccole superfici.	Condizioni stazionali molto favorevoli.	Basso
Idrosemine	Versanti anche acclivi in stazioni a clima mite, in particolare poco esposto al sole e con periodo arido limitato, con fenomeni erosivi non intensi; scarpate e rilevati stradali e in genere cantieri facilmenti accessibili (ad eccezione uso di elicottero).	< 30° ÷ 35°	Media	Procedimento rapido in cui tutte le operazioni sono concentrate in una sola fase; elevata produttività; possibilità di utilizzo di elicottero.	Condizioni stazionali relative favorevoli; disponibilità di acqua in cantiere; non si adatta a piccole superfici.	Medio - basso

(*segue*)

Segue tab. 10.4 *- Principali opere di copertura*

Tecnica	Impiego	Inclinazione del versante (°)	Efficacia	Vantaggi	Svantaggi	Costo
Semina a spessore	Adatta per quasi tutte le situazioni. Potendo variare a piacere i componenti della miscela, questa tecnica è idonea a coprire grandi e medie superfici, anche a forte pendenza, terreni grezzi e scarpate con limitata copertura sciolta.	Da superfici piane fino a 50° ÷ 60°	Elevata	Può essere applicata durante l'intero periodo vegetativo; permette di distribuire contemporanea mente sul terreno numerose sostanze essenziali per il successo dell'intervento.	-	Medio
Semine su reti o stuoie	Versanti ripidi, soggetti ad erosione idrica o eolica in condizioni non estreme, per aridità estiva ed elevate temperature al suolo; corona di frana riprofilata.	> 15° ÷ 20° e fino a 35° ÷ 37°	Elevata	Immediata protezione del suolo; miglioramento del microclima al suolo.	Trasporto materiali in cantiere; posa in opera in più fasi.	Medio - alto
Semine con coltre protettiva (paglia, fieno ecc.)	Versanti soggetti ad erosione idrica o eolica in condizioni difficili per quanto riguarda l'aridità, gli estremi termici il terreno; suoli argillosi variabile.	Variabile	Elevata	Immediata protezione del suolo; forte miglioramento delle condizioni stazionali.	Trasporto materiali in cantiere; posa in opera in più fasi.	Medio - alto

le isoipse e che si ripetono secondo un determinato interasse (diverso a seconda della tecnica di Ingegneria Naturalistica impiegata).
È necessario tenere in considerazione l'efficacia degli interventi in funzione della profondità di radicazione delle piante (per esempio, sulle gradonate vive) e dell'interasse tra le stesse. Nel caso di gradonate vive, infatti, già dopo l'inserimento delle prime piante, la stabilità aumenta di un terzo (Florineth, 1995; Hofmann, 1963); si veda a tale riguardo la relativa scheda nella terza parte del presente *Manuale*.
Non tutte le tecniche di Ingegneria Naturalistica sono adatte allo scopo; ad esempio le graticciate (o le viminate) presentano i seguenti problemi:

- radicazione modesta delle talee in relazione alla gran quantità di materiale impiegato;
- necessità di verghe lunghe e regolari atte all'intreccio;
- facilità di disseccamento e di scalzamento;
- facilità di danneggiamento per la spinta delle terre, per caduta sassi e per azione della neve;
- costi abbastanza elevati di realizzazione.

Nel caso in cui si vogliano utilizzare le *viminate vive*, queste vanno adagiate su un gradoncino largo almeno 40 cm e poi interrate con altezze dal terreno non superiori a 30 cm.
Le *viminate con materiale morto*, conservano una certa importanza solo in quanto svolgono il temporaneo contenimento superficiale del terreno, in attesa che la vegetazione si insedi completamente e, quindi, sono adatte da sole all'impiego quale tecnica di sistemazione.
Altre opere di antica tradizione costruite con materiale vegetale vivo sono le *fascinate*; queste possono essere impiegate per il controllo dei fossi se disposte trasversalmente al versante, oppure longitudinalmente, per stabilizzare l'intero pendio (con inclinazioni inferiori a 30° ÷ 35°).
Le *gradonate vive* sono diffuse in ambiente alpino perché consentono di riparare i danni provocati dall'erosione, non eccessivamente profonda, nei versanti o da scoscendimenti superficiali, mediante l'impiego di talee di salicacee che conservono nei primi anni di vita una notevole flessibilità, in modo tale che il peso delle nevicate le pieghi, ma non le spezzi (Puglisi, 2000).
Le più importanti opere di stabilizzazione sono descritte nella **tabella 10.5**.

10.4.3 Campo d'applicazione per le opere di sostegno

Dalla "legge del minimo", sappiamo che l'Ingegneria Naturalistica deve essere impiegata solo dove e quando sia realmente necessaria: si devono impiegare le tecniche a minore complessità che non richiedano, quindi, ingenti costi a parità d'efficacia. In ambito di dissesto dei versanti di un certo rilievo (la cosiddetta *esposizione* nella formula del rischio), è obbligatorio intervenire ove si temano danni ai beni presenti nelle vicinanze, o danni indiretti causati dalla produzione di detrito verso valle.
Si ha infatti:

$$R = V * P * Esp$$

dove:

- *R = Rischio*. Probabilità, caratteristiche e modalità del verificarsi di un evento dannoso per la salute umana e per l'ambiente. In particolare, per rischio ambientale si intende uno stato in cui sono presenti condizioni di pericolosità o di minaccia ipotetica verso l'ambiente e l'uomo. Nella stragrande maggioranza dei casi l'analisi dei rischio tende ad estromettere la dimensione percettiva dell'individuo che spesso è fondamentale. La maggior parte degli studi sul rischio adotta come principio base la formula per cui il rischio sarebbe uguale alla probabilità che un evento indesiderato avvenga in un certo arco temporale, definendo il rischio attraverso una funzione di tipo statistico. Probabilità del verificarsi di un danno ambientale moltiplicata per la grandezza del danno stesso. Nelle procedure di VIA esprime la possibilità che gli interventi dell'uomo superino un livello tale da provocare sensibili e spesso irreversibili fenomeni di inquinamento e di dissesto con alterazione degli equilibri preesistenti (Ministero dell'Ambiente);
- *V = Vulnerabilità*. Si intende l'insieme complesso di tutto ciò che esiste ad opera dell'uomo in un certo territorio e che direttamente o indirettamente è suscettibile di un danno materiale (Panizza, 1992);
- *P = Pericolosità*. È la probabilità che un certo fenomeno di instabilità geomorfologica si verifichi in un certo qual territorio in un determinato intervallo di tempo (Panizza, 1987);
- *Esp =Esposizione*. È il valore dell'elemento a rischio, ovvero il valore (che può essere espresso in termini monetari o di numero o di quantità di unità esposte) della popolazione, delle proprità e delle attività economiche, inclusi i servizi pubblici, a rischio in una data area.

L'Ingegneria Naturalistica in realtà è in grado di agire sui primi due fattori, riducendo sia la vulnerabilità, sia la pericolosità intrinseche al versante.
L'impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica su versante è in funzione di diversi parametri, quali:

- caratteristiche morfologiche del pendio;
- caratteristiche geologiche e geomeccaniche dei litotipi;
- andamento della superficie freatica e delle acque di scorrimento superficiale;
- condizioni climatiche, pedologiche, vegetazionali;
- caratteristiche delle specie vegetali e del materiale naturale impiegati;
- capacità tecnico-operative del personale e disponibilità dei mezzi di lavoro.

L'inserimento di materiali vivi è fondamentale per il raggiungimento dell'efficacia di queste opere, in quanto la funzione di sostegno può essere svolta dalla vegetazione, qualora le strutture di sostegno in legname decadano strutturalmente per il deperimento del legname.
Dal punto di vista tecnico, s'indicano di seguito alcuni accorgimenti costruttivi (Galeotti, 2000):

- lo spessore delle opere deve essere compatibile con la profondità raggiungibile da parte degli apparati radicali delle piante utilizzate; se ciò non accadesse, al termine dell'azione di consolidamento esercitato dal legname, verrebbe a mancare la funzione sostitutiva di sostegno delle radici. Lo spessore medio più verosimilmente consolidato è variabile tra 2 m e 3 m in condizione di terreno medio; se il terreno è ben "compattato" (ad esempio, terreno argilloso), avremo una minore profondità (tra 0,5 e 1,5 m circa); se è ben arieggiato, possiamo arrivare anche a 5 ÷ 7 m in quanto le radici si fermano dove non vi è più sufficiente disponibilità di aria;
- l'altezza delle opere in condizioni medie, è consigliabile non superi i 3 m ed il rapporto tra la profondità dell'opera e l'altezza, deve essere almeno uguale a 0,50 ($b/h \geq 0{,}50$). Ciò significa che la base, nel caso di un'altezza di 3 m, dovrà essere almeno di 1,5 m (valore cautelativo di profondità a cui le radici potranno, in condizioni medie di terreno, agevolmente arrivare);
- l'inclinazione del paramento esterno della struttura impiegata è consigliabile sia inferiore ai 65° e comunque ≤ 60°, questo affinché le piante possano ricevere acqua piovana a sufficienza, senza però che questa ristagni;
- si consiglia l'impiego di specie arbustive rispetto a quelle arboree, con rapporto biomassa epigea/ipogea più elevata.

Le opere di Ingegneria Naturalistica su versante sono costruite generalmente in punti particolari, che richiedono maggiore consolidamento, come la corona e il piede, oppure nelle aree più acclivi. Queste opere sono soggette alle disposizioni del DM 11 marzo 1988 in materia di norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Nella **tabella 10.6** (tratta dal *Manuale* della Regione Toscana, 2000 e modificata da Palmeri, 2002) sono descritte le principali opere di sostegno.

Tab. 10.5 - *Principali opere di stabilizzazione*

Tecnica	Impiego	Dimensioni	Efficacia tecnica	Efficacia ecologica	Vantaggi	Svantaggi	Costo
Gradonata con talee ed eventualmente con piantine	Consolidamento di scarpate anche molto ripide e di rilevati; la più efficace delle sistemazioni stabilizzanti; su pendii molto ripidi con elevato rischio di erosione è consigliabile adottare un'armatura in tondame, mentre in stazioni aride con terreni sciolti un rinforzo longitudinale sec. Rainer.	B = 0,8 – 1,5 (fino a 5m nei rilevati) l = 2 ÷ 3 (5) m β" = 5°÷10°	Elevata	Elevata	Azione in profondità; esecuzione semplice e rapida; utilizzo di materiale vivo di ogni tipo; esecuzione manuale o meccanizzata; con l'inserimento di piantine di accelerazione della successione.	Necessità di elevate quantità di materiale vivo; cattiva ritenuta del terreno; difficoltà di sviluppo su falde detritiche in stazioni aride a seconda delle specie impiegate; forte impiego di materiale vivo.	Medio - basso
Cordonata sec. Praxl	Consolidamento di pendici con ristagni idrici, di terreni argillosi, di suoli poveri in sostanza organica.	b>0.6 l = 3 m β" = 5°÷10°	Elevata	Elevata	Possibile profondità elevata di radicazione; aerazione degli apparati radicali.	Elevato fabbisogno di talee e di ramaglia di conifere; scavo profondo in genere.	Medio - alto
Fascinata e fascinata con piantine	Drenaggio e consolidamento pendii umidi se disposte obliquamente; per stazione aride se disposte orizzontalmente; in ogni caso per stazioni favorevoli con inclinazione inferiori a 30° ÷ 35°.	b = 0,4 – 0,6 m l = 1,5 ÷ 3 m	Media	Media	Rapidità e semplicità di esecuzione se le fascine sono già pronte; scarsi movimenti di terra.	Limitato effetto in profondità; impossibilità di usare ramaglia corta e contorta; sensibile alla caduta di sassi; forte impiego di materiale vivo.	Medio – basso
Palizzata con talee e/o piantine	Consolidamento e contenimento superficiale del terreno; riduzione della pendenza media; utili su falde detritiche e ove si debbono minimizzare gli scavi; disposte in linee continue oppure a scacchiera.	h = 0,3 – 0,5 m i = 2 – 4 m	Media	Media	Immediata ritenuta del terreno; stabilizzazione superficiale di falde detritiche; scavi molto ridotti.	Efficacia superficiale.	Medio

Legenda:
B = distanza tra i gradoni trasversali al versante; b = profondità e larghezza dello scavo nelle fascinate; h = altezza della sporgenza nella palizzata; l = lunghezza delle fascine, o delle talee o, comunque della ramaglia; i = lunghezza tondame; β" = contropendenza dello scavo del gradone.

Tab. 10.6 - *Principali opere di sostegno*

Tecnica	Impiego	Dimensioni	Efficacia tecnica	Efficacia ecologica	Vantaggi	Svantaggi	Costo
Palificata ad una parete rinverdita	Consolidamento movimenti poco profondi.	H<1.5 b/H = 0,75÷1,0 β'= 60-75 β'' = 5-10	Media	Elevata	Possibile impiego di materiali in loco; deformabilità; leggerezza; adattabilità alla morfologia; rapidità e facilità di costruzione; permeabilità.	Altezza limitata; durata limitata legname.	Medio - basso
Palificata a doppia parete rinverdita	Consolidamento movimenti poco profondi o mediamente profondi se in combinazione con micropali; sottoscarpa e controripa viabilità forestale o pedonale.	H< 2.5 (3) b/H = 0,75 ÷ 1,0 β'= 60-75 β'' = 5-10	Da media ad elevata	Elevata	Possibile impiego di materiali in loco; deformabilità; leggerezza; adattabilità alla morfologia; rapidità e facilità di costruzione; permeabilità.	Altezza limitata; durata limitata legname.	Medio - basso
Grata a parete semplice o doppia rinverdita	Scarpate alte e acclivi, senza possibilità di arretramento del ciglio, soggette ad erosione o movimenti gravitativi superficiali.	H< 15 (20) β' = 40÷55 (60)	Media	Elevata	Unica opera possibile; materiali in loco; effetto immediato; adattabilità alla morfologia.	Laboriosità dell'esecuzione; necessità di tronchi lunghi.	Medio - alto
Gabbionata rinverdita	Consolidamento pendii, in particolare al piede e in terreni umidi e/o argillosi; sistemazione della viabilità.	Variabili β'<75 β''= 5	Da media ad elevata	Media	Deformabilità; permeabilità; facile e rapidità esecutiva.	Disponibilità di pietrame in loco; difficoltà di inserimento piante.	Medio - basso
Terra rinforzata	Sostegno di pendii instabili, in particolare al piede e formazione di rilevati ripidi, in zone povere di pietrame.	Variabili; β'<75, meglio se $\beta' \approx 60$	Elevata	Media	Materiali di sito; deformabilità; facilità e rapidità esecutiva.	Disponibilità di pietrame in loco; difficoltà di inserimento piante.	Medio - alto
Scogliera in massi ciclopici rinverdita	Consolidamento al piede di versante; controripa visibilità.	H< 3 (4) β'< 45 (55)	Media	Elevata	Deformabilità; permeabilità; semplicità esecutiva.	Disponibilità massi in loco e necessità di macchine potenti: cantieri accessibili.	Medio
Muro cellulare rinverdito	Consolidamento versanti, in particolare al piede; sistemazione della viabilità.	Variabili in relazione al fabbricante; h<5 (6) β'<75	Elevata	Bassa	Rapidità e semplicità di costruzione; effetto immediato; sopporta elevate spinte con altezze anche consistenti; lunga durata; possibilità di riutilizzo degli elementi.	Elevata massa degli elementi; difficoltà di trasporto e movimentazione; teme la caduta di sassi; microclima sfavorevole alle piante.	Alto
Cuneo filtrante	Sostegno al piede di scarpate con ristagni idrici, eventualmente in abbinamento a palificate, scogliere, ecc.	Variabili con le caratteristiche geotecniche del materiale inerte e con l'inclinazione del versante.	Elevata	Media	Semplicità	Necessita di inerti in quantità e di macchine potenti: cantieri accessibili.	Medio

Legenda: h = altezza (m); b = profondità (m); ß' = inclinazione del parametro di valle (espressa in gradi); ß'' = inclinazione verso il monte del piano di fondazione (espressa in gradi).
(*) I costi sono relativi tra le opere descritte.
Fonte: Regione Toscana, 2000, (modificata da Palmeri, 2002).

Se si assimilano le opere di sostegno a quello che Hoffmann (1995) definisce "muro a gravità" di tipo naturalistico, dato da una porzione di terreno caratterizzata da una fitta radicazione di piante precedentemente messe a dimora, avremo le radici che, se cresciute uniformemente, permettono al corpo terroso di reagire in modo omogeneo alle forze e ai momenti esterni e, quindi, verrà verificata la stabilità dimensionale della struttura.
Nella **figura 10.6** viene illustrato schematicamente il dimensionamento di un muro a gravità realizzato con tecniche di Ingegneria Naturalistica. Nel grafico il rapporto altezza/larghezza è ricavato dalla prova di rovesciamento. Hoffmann spiega che, in base a questo grafico, un muro a gravità a profilo verticale alto 1,85 m deve essere largo 1 m, ovvero che l'irradicamento deve coinvolgere il corpo terroso per un metro di profondità ed essere sufficientemente compatto, abbastanza da evitare fessurazioni.
Questa larghezza diminuisce sensibilmente con l'aumentare dell'angolo a (in caso di scarpate non verticali e, quindi, con l'aumento d'inclinazione della base dell'opera verso monte), ed inoltre il muro di terra può raggiungere altezze superiori. Vari studi, sostiene Hoffmann, confermano che le radici delle piante hanno un importante effetto consolidante sul terreno, anche se non esistono dati generali sul grado di consolidamento in funzione delle varie specie vegetali, del numero di piante messe a dimora e di altre variabili. La valutazione del precedente grafico porta alla conclusione generale che un effetto stabilizzante di determinate radici sul terreno è possibile solo fino a uno spessore dell'opera pari a 1 m. Non si esclude, comunque, che se tutte le variabili sono favorevoli e la manutenzione dell'opera viene effettuata correttamente, l'effetto stabilizzante delle radici, intervenga anche per spessori superiori al metro. Tutto ciò nel primo periodo di vita delle piante (3 ÷ 5 periodi vegetativi) ed in assenza dell'azione di sostegno operata, per esempio, dal legname.

Fig. 10.6 - *Rapporto altezza/larghezza di un'opera di tipo naturalistico*

Fonte: Hoffman, 1995.

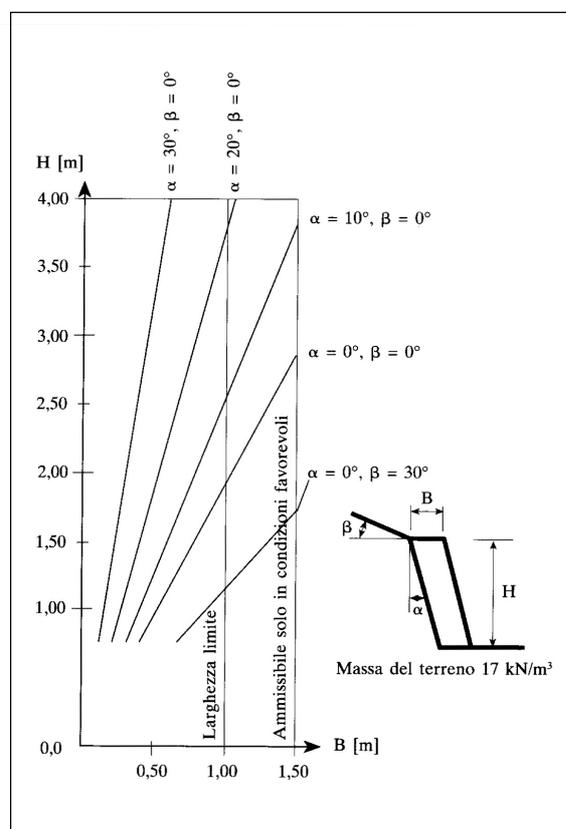
10.4.4 Opere di completamento

Sono tecniche che consentono di agevolare lo sviluppo della cenosi vegetale verso lo stadio seriale ricercato e comprendono principalmente la messa a dimora di specie arbustive ed arboree:

- *semina di specie legnose*: si consiglia di aggiungere al miscuglio per l'idrosemina semi di specie arboree ed arbustive;
- *piantagione in buca con postime a radice nuda*: si scelgono specie pioniere non fittonanti, in climi non aridi, in terreni possibilmente non grezzi; si sottolinea l'importanza del trasporto del materiale (bisogna evitarne il disseccamento);
- *piantagione in buca con postime in contenitore*: in questo caso si possono collocare anche specie fittonanti in stazioni difficili per aridità del clima e del suolo;
- *piantagione inclinata (ad angolo) con postime a radice nuda di piccole dimensioni*: il terreno deve presentare scarse quantità di scheletro, di argilla e di humus grezzo, ed il cotico erboso deve essere basso;
- *piantagione a fessura (con vanga) con postime a radice nuda di piccole dimensioni*: richiede le stesse caratteristiche di cui sopra, tranne la presenza di cotico preesistente;
- *piantagione con asta trapiantatrice (postime di piccole dimensioni in contenitore)*: richiedono terreni sciolti e bassa vegetazione.

Altre tecniche di rimboschimento che possono essere impiegate su versante possono essere le seguenti:

- *cordonata secondo Couturier*: è una piantagione di piante pioniere a radice nuda su gradone con successivo ricoprimento del medesimo;
- *gradonata con piantine*: messa a dimora suborizzontale di specie pioniere (principalmente con capacità di radici avventizie) a radice nuda su gradone, con successivo ricoprimento dello stesso.

Questi metodi possono essere utilizzati anche come sistemazioni stabilizzanti. Per tutti gli interventi complementari è consigliabile un'effettuazione posticipata rispetto alla sistemazione principale, in modo da consentire alla vegetazione erbacea ed arbustiva di evolversi favorevolmente rispetto alle particolari condizioni pedoclimatiche e di stabilità di pendio.

Alcuni accorgimenti di carattere generale, per evitare che fattori climatici estremi, elevate pendenze di versante e condizioni edafiche, influenzino negativamente l'impianto in tutte le sue fasi, possono essere di seguito elencati:
- *allontanamento delle vegetazione esistente a strisce*: in caso di postazioni aride;
- *preparazione del suolo*:
  - *buche*: non in stazioni aride o in terreni argillosi;
  - *gradoni*: su pendii ripidi, in stazioni aride o comunque in terreni drenati;
  - *strisce*: stazioni aride con pendenze moderate (i < 35°);
  - *piazzole* (parti di gradoni): versanti con rocce affioranti;
  - *piazzette* (parti di strisce): versanti con rocce affioranti ma con pendenze più moderate;
- *profondità di piantagione*: in stazioni aride è bene che sia profonda;
- *conformazione del terreno attorno al colletto*: convessa in stazioni umide, concava in stazioni aride;
- *pacciamatura* (paglia o fieno, ricoperto con terra, prodotti organici o di sintesi): in stazioni aride e terreni grezzi, con vegetazione esistente aggressiva;
- *miglioramento del terreno*: da effettuarsi con concimazioni e polimeri idroritentori, se il terreno è povero o arido;
- *copertura della buca con zolle erbose*: in caso di versanti soggetti ad erosione idrica ed eolica;
- *piantagione a mazzetti o a ciuffi*: da effettuarsi in punti al limite altitudinale della vegetazione arborea, in zone a forte ventosità e soggette alla pressione delle nevicate o di cadute sassi.

10.5 Sistemazione dei versanti calanchivi con tecniche di Ingegneria Naturalistica

Si riporta una soluzione idonea alla sistemazione dei versanti in erosione, tratta dall'esperienza di Puglisi (2000), in particolare su terreno caratterizzato dalla presenza di forme d'erosione calanchiva.
Il metodo consiste nel predisporre il terreno al ritorno spontaneo della vegetazione. In alcuni ambiti come superfici di frana dopo il drenaggio e il modellamento, o in alvei torrentizi dopo l'imbrigliamento, è stato osservato (Puglisi, 2000) che la stabilizzazione delle particelle costituenti il suolo consente il rinvenire della vegetazione.
Questa considerazione e l'osservazione che in presenza di forme calanchive, la scarsa vegetazione spontanea non riesce a diffondersi a causa delle colatine di fango che la prostrano e la privano di fiori, frutti e semi, hanno consentito di mettere a punto una tecnica di preparazione del terreno che impedendo la formazione delle suddette colatine di fango consente alla vegetazione spontanea di disseminare tutt'intorno e affermarsi dove il seme trova siti in cui può germinare perché gli sono risparmati lo scalzamento/soffocamento, nonché assicurato un rifornimento idrico ipodermico costante e la protezione dell'apice radicale. Alla testata del calanco si aprono piccoli fossi di guardia che si fanno scaricare sui dossi. Segue l'apertura di solchi a spina di pesce dentro i compluvi e recapito dei medesimi sulle creste. In tal modo si abbassano i dossi, si impedisce la formazione delle colatine fangose e si facilita l'affermazione della vegetazione. Le creste a lama di coltello, già modellate possono a loro volta rinverdirsi e coprirsi di cespugli. Detto intervento di solito è parte di sistemazioni idraulico-forestali di bacini o sottobacini più ampi della pendice rinverdita o cespugliata.

10.6 Consolidamento dei versanti mediante l'impiego dei salici in Ingegneria Naturalistica

Le sistemazioni stabilizzanti su versante con tecniche di Ingegneria Naturalistica, richiedono vegetazione con rami vivi o talee di specie con capacità di propagazione vegetativa e con capacità di produzione di radici avventizie. Per questo motivo sono da preferire rami di salici aventi questa facoltà insieme a piante legnose radicate.
Fra tutti gli interventi stabilizzanti possiamo considerarne alcuni, particolarmente efficaci, di seguito elencati:
- *fascinate vive su pendio*: vengono impiegate raramente per il consolidamento dei versanti in quanto poco efficaci, nonostante il maggiore dispendio lavorativo. Utilizzano fascine disposte sul versante a forma di spina di pesce o in strati orizzontali;
- *viminate vive*: per poterli costruire occorrono rami che s'intreccino con facilità e che siano cresciuti diritti e lunghi. Questa tipologia permette di rinforzare solo gli strati più superficiali di terreno. Per questi motivi oggi si impiega tale tecnica insieme ad altre tipologie, in opere di prosciugamento piuttosto che per il consolidamento di versante;
- *gradonate con ramaglia viva* costruite quasi esclusivamente con rami di salici. Questa tipologia garantisce la massima azione in profondità;
- *gradonate con latifoglie radicate e ramaglia viva* che prevede, oltre a rami di salici, anche piante legnose radicate; anch'essa garantisce stabilizzazione in profondità;
- *cordonate vive*: anch'esse hanno perso importanza per gli stessi motivi di cui sopra.

Per sostenere ripide scarpate si possono impiegare materiali inerti che, dopo la costruzione delle armature possono essere completate con rami di salice e piante radicate. Si hanno così:
- *geotessili* (*soft gabions*): sostituiscono a loro volta gabbioni rigidi riempiti di sassi; queste tecniche si adattano meglio alla morfologia del terreno e possono essere riempiti con pie-

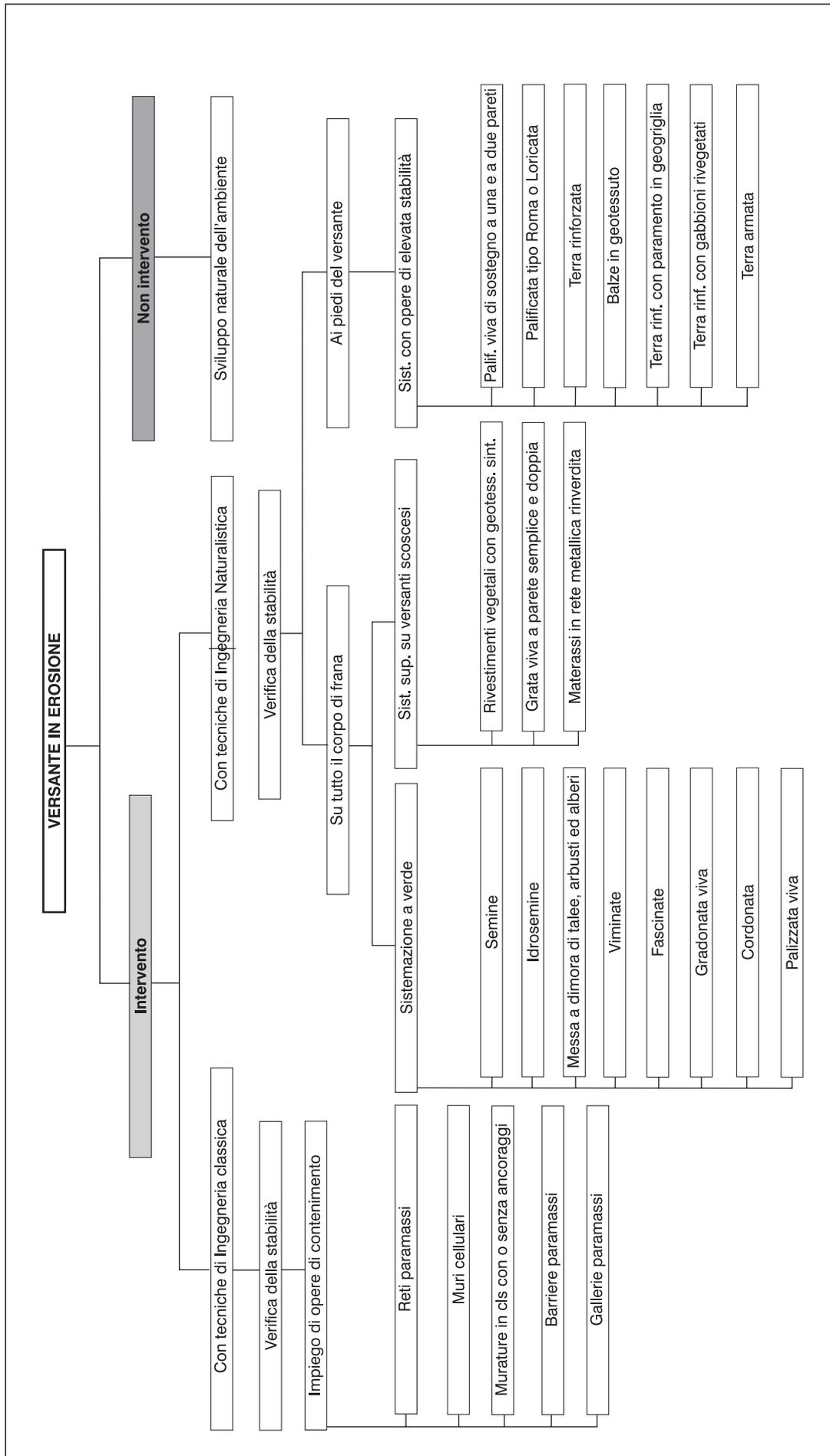
trisco, ghiaia o sabbia, preferibilmente reperibile *in situ*. I rami di salice vengono disposti tra un elemento e l'altro oppure anche attraverso gli stessi materassi geotessili, facendo attenzione a non rovinarli;
- *palificata viva di sostegno*: le radici dei rami di salice che vengono inseriti entro la costruzione, svolgono una funzione di sostegno e di appoggio del legname marcito;
- *gabbioni metallici* (*hard gabions*): sono tecniche sostitutive delle murature precedenti; i rami di salice sono qui disposti a strati tra un gabbione e l'altro;
- *murature a secco con talee di salice inserite nelle fessure*: è un vecchio metodo costruttivo che oggi utilizza non più la manodopera per la deposizione del materiale, ma macchine che rendono possibile l'impiego di elementi lapidei di diametro maggiore. Le talee di salice devono essere, così, più robuste e penetrare tra le fessure della muratura fino al terreno retrostante. Preferibili le specie di salici a forma strisciante o prostrata;
- *grate vive*: sono in legno, con tondini in ferro e si completano con i rami di salice nello stesso modo delle palificate.

Se si combinano le diverse tecniche di Ingegneria Naturalistica si prolungherà la durata delle opere e si miglioreranno gli effetti stabilizzanti da esse prodotti (materiale di riempimento e sottofondo), grazie alle radici dei salici resistenti alla trazione. Anche l'elevato consumo d'acqua da parte dei salici, produce un benefico prosciugamento dell'intero materiale terroso compenetrato dalle radici.

10.7 Principi d'intervento su versanti in erosione

Nella sistemazione con tecniche di Ingegneria Naturalistica di versanti in frana o, comunque, soggetti a fenomeni di erosione, è necessario procedere seguendo dei principi fondamentali e sempre nel rispetto della "legge del minimo", quali:
- *impiego di tecniche di Ingegneria Naturalistica* via via più complesse e interessanti una profondità di intervento sempre maggiore, procedendo da monte verso valle, ovvero con l'aumento dello spessore di terreno movimentato. Dopo le consuete analisi preliminari è necessario intervenire, in corrispondenza della parte sottostante la corona di distacco con tecniche di Ingegneria Naturalistica stabilizzanti (dalla *piantagione* alla *viminata*, alla *fascinata*, alla *cordonata* e *palizzata*), ovvero dove lo spessore di terreno è relativamente esile e, di conseguenza, è sufficiente impiegare tecniche poco intensive. Il materiale accumulato per gravità al piede del versante (perciò più potente) e, comunque, man mano che si scende a valle, dovrà essere stabilizzato con interventi maggiormente impegnativi (sia strutturalmente che come costi), per difendere la base del versante, assicurare stabilità a tutto il corpo di frana e, di conseguenza, mettere in sicurezza l'intero versante (palificate vive di sostegno, cunei filtranti, terre rinforzate, scogliere di massi ciclopici rinverdite, ecc.);
- *localizzazione della superficie di scivolamento*: questo concetto è gia stato accennato nel paragrafo 10.1, ma viene qui ripreso per precisare che la profondità massima di stabilizzazione delle opere di Ingegneria Naturalistica raggiunge i 3 ÷ 3,5 m (in particolare, se il terreno è in materiale fine e costipato, la profondità di scavo è minore; al contrario, se il terreno presenta una granulometria grossolana, lo scavo raggiunge maggiori profondità); pertanto, se il piano di scivolamento è collocato ad una profondità inferiore ai 3,5 m è possibile intervenire con tecniche di Ingegneria Naturalistica allo scopo di consolidare il terreno (tramite l'apparato radicale delle piante). Al contrario, se la superficie di frana è ad una profondità superiore ai 3,5 m, allora si dovrà ricorrere a tecniche di ingegneria classica (si veda lo schema successivo), nel rispetto della "legge del minimo". Come variante a queste due possibilità d'intervento, si consiglia di impiegare tecniche miste: al piede del versante si possono adottare tecniche classiche, qualora vi siano le condizioni appropriate (potenza elevata del materiale movimentato, urgenza d'intervento, ecc.), mentre sul corpo di frana si può ricorrere ad interventi superficiali, consolidanti o di drenaggio, al fine di ridurre una successiva caduta gravitativa di materiale e/o di riduzione della pendenza (ad esempio, con palificate vive di sostegno e riporto di terreno vegetale); ciò naturalmente nel caso in cui una tecnica di Ingegneria Naturalistica (palificate vive di sostegno, gabbionate rinverdite, terre rinforzate, scogliere rinverdite) non risultino sufficienti alla risoluzione del problema del fissaggio al piede (consolidamento) del versante;
- *verifica di stabilità al piede del versante*: quest'analisi condiziona notevolmente, non solo nella scelta dell'impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica, ma anche nell'eventuale possibilità di intervenire con opere di ingegneria classica o, adirittura, di non intervenire affatto. Si può infatti schematizzare quest'ultimo concetto seguendo il percorso del diagramma della **figura 10.7**, tenendo sempre presente la "legge del minimo" e la gravità del fenomeno di dissesto. Le opere di Ingegneria Naturalistica possono essere impiegate, in questo ambito, come interventi di consolidamento al piede e di copertura antierosiva sul resto del versante, assecondando il naturale sviluppo dell'ecosistema.

Le opere di ingegneria classica, nei casi di maggior dissesto idrogeologico, interverranno come opere di contenimento del problema, spesso, però, non nel rispetto della naturale evoluzione del paesaggio.

Fig. 10.7 - *Principi d'intervento su versanti con tecniche di Ingegneria Naturalistica*

Fonte: Palmeri, Balboni, 2002.

10.8 Analisi di stabilità dei pendii

L'analisi di stabilità dei pendii viene normalmente affrontata con *modelli dell'equilibrio limite* che studiano le condizioni di equilibrio di volumi di terreno delimitati inferiormente da superfici di scorrimento.
L'analisi è limitata a detti volumi, senza esaminare lo stato tensionale e deformativo dell'intero pendio, valutando il solo stato tensionale lungo le potenziali superfici di scorrimento che limitano inferiormente i volumi presi in esame e lungo le quali viene definito il coefficiente di sicurezza allo scorrimento (Sacchetti, Ghinelli, 2000 in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000).
La superficie critica è quella caratterizzata dal minimo valore del coefficiente di sicurezza che esprime le condizioni di stabilità del pendio. La ricerca sulla superficie critica viene condotta in modo diverso in funzione delle condizioni geomorfologiche, litologiche, geomeccaniche e di stabilità del sito.
Questa ricerca è rivolta alla valutazione del coefficiente di sicurezza definito tramite l'espressione:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_m}$$

dove:

τ_f = resistenza al taglio media disponibile lungo la superficie di scorrimento;
τ_m = resistenza media mobilitata, ossia lo sforzo tangenziale medio che equilibra il peso del volume di terreno e degli eventuali carichi applicati lungo la superficie di scorrimento;
F = coefficiente di sicurezza, che rappresenta il termine per il quale deve essere divisa la resistenza al taglio disponibile per determinare le condizioni di rottura lungo la superficie determinata.

Generalmente la condizione di rottura viene imposta riducendo in eguale misura le differenti componenenti della resistenza al taglio di tutti i terreni incontrati dalla superficie di rottura. Nella realtà ciò non si verifica, in quanto il grado di mobilitazione della resistenza al taglio delle singole porzioni di terreno interessate dalla superficie di scorrimento, è legato al regime delle deformazioni, a loro volta differenti per i tipi di terreni.

10.8.1 Parametri di resistenza

In caso di pendii instabili in terreni saturi, l'analisi per il calcolo dei parametri di rottura, può essere espressa sia in termini di tensioni totali, sia in termini di tensioni effettive.
Al primo caso si fa ricorso in condizioni non drenate, considerando che:

$$\tau_f = c_u$$

in cui:

τ_f = resistenza al taglio;
c_u = coesione non drenata.

Ragionando in termini di tensioni effettive, ci si basa sulla resistenza dello scheletro solido la quale viene determinata tramite prove drenate o non drenate con misura delle pressioni neutre.
L'espressione della resistenza al taglio disponibile è quella di Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

dove:

c' = coesione dello scheletro solido;
φ' = angolo d'attrito o di resistenza al taglio dello scheletro solido;
σ' = tensione normale effettiva sul piano di rottura.

La tensione normale effettiva è legata a quella normale totale σ ed alla pressione neutra *u* dal criterio delle tensioni effettive di Terzaghi, espresso dalla relazione:

$$\sigma = \sigma' + u$$

Nelle condizioni drenate il regime delle pressioni neutre *u* sarà "in equilibrio" con le condizioni idrauliche al contorno; nelle condizioni non drenante tale condizione non si verificherà (Sacchetti, Ghinelli, 2000, in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000). Come è noto nei terreni a grana grossa si verifica sempre la condizione drenata (ad eccezione delle condizioni di sollecitazione sotto sisma), in quanto la permeabilità degli stessi risulta sufficientemente elevata da consentire in tempi rapidi il ristabilirsi delle condizioni di "equilibrio" delle pressioni neutre con le condizioni idrauliche al contorno. Nei terreni a grana fine, di bassa permeabilità, può verificarsi tanto la condizione drenata quanto quella non drenata.
L'analisi delle condizioni in termini di tensioni totali è apparentemente più semplice; il punto fondamentale del metodo è la valutazione attendibile della coesione non drenata c_u che condiziona in modo proporzionale il coefficiente di sicurezza.
Questo parametro è influenzato da caratteri di disomogeneità e discontinuità in genere a scala maggiore di quella del campione esaminato in laboratorio e, pertanto, la sua indeterminatezza è elevata (Sacchetti, Ghinelli, 2000 in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000). Più razionale appare l'approccio in termini di tensioni effettive. In questo caso è indispensabile, però, la conoscenza del regime delle pressioni neutre.
I metodi di calcolo vengono perciò presentati in termini di tensioni effettive, ipotizzando noto il regime delle pressioni neutre. Nei pendii naturali queste ultime sono legate alla struttura lito-stratigrafica ed al regime pluviometrico. Di difficile attuazione è la loro previsione teorica

ed è indispensabile ricorrere alla loro misura attraverso l'installazione di un significativo numero di piezometri.
L'analisi di stabilità andrebbe eseguita in base alla condizione idraulica più gravosa prevedibile.
Nella maggior parte dei tecnici, si dispone di misure eseguite in un tempo sempre limitato e pari solo ad alcuni mesi o qualche anno e tali da non rendere attendibile la suddetta previsione.
Per quanto attiene ai parametri di resistenza al taglio occorre ricordare come, di solito, le superfici critiche nei pendii naturali risultino abbastanza superficiali e tali da essere condizionati dalla coesione drenata *c'* che, al pari della coesione non drenata c_u risulta di difficile determinazione. Più attendibile risulta, invece, la determinazione in laboratorio dell'attrito ϕ' (Sacchetti, Ghinelli, 2000, in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000).

10.8.2 Metodi per l'analisi di stabilità di pendii naturali ed artificiali

Il caso più semplice per affrontare l'analisi di stabilità dei pendii, è quello che vede l'applicazione ad un pendio indefinito dei differenti metodi a nostra disposizione. Con il termine "pendio indefinito" si individua un declivio a pendenza costante sufficientemente esteso, in modo tale che le considerazioni relative ad un suo elemento tipico possano essere estese all'intero pendio (Sacchetti, Ghinelli, 2000 in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000). Le proprietà geomeccaniche del terreno e la pressione neutra sono costanti lungo piani parallelei al piano campagna (**fig. 10.8**)
È possibile calcolare le tensioni normale e tangenziale agenti su una giacitura parallela al piano campagna.
Definiamo come *tensione normale totale*:

$$\sigma = \gamma Z \cos^2 \beta$$

e come *tensione normale tangenziale*:

$$\tau = \gamma Z \ \mathrm{sen}\,\beta \cos \beta$$

in cui:

β = inclinazione del pendio;
Z = profondità della giecitura considerata;
γ = peso dell'unità di volume del terreno (γ_{sat} se il terreno è saturo).

Il coefficiente di sicurezza definito come rapporto fra la resistenza τ_f a taglio disponibile e la τ_m mobilitata, sarà:

$$F = \frac{c' + \left(\gamma Z \cos^2 \beta - u\right) \tan \varphi'}{\gamma Z sen\beta \cos \beta}$$

Il coefficiente di sicurezza cresce linearmente con la coesione c' e con la tangente dell'angolo d'attrito, mentre diminuisce con la pressione neutra *u* e risulta, inoltre, funzione decrescente della profondità.
Nel caso in cui il versante sia interessato da un moto di filtrazione parallelo al piano campagna, la pressione neutra sarà data dalla seguente relazione:

$$u = \gamma_w h_w \cos^2 \beta$$

dove h_w è la profondità della superficie di scorrimento rispetto alla superficie libera della falda.
In questo caso, il *coefficiente di sicurezza* vale:

$$F = \frac{c' + \left(\gamma Z - \gamma_w\right) \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma Z sen\beta \cos \beta}$$

Introducendo il *coefficiente di pressione neutra* r_u, pari al rapporto tra la pressione neutra e la tensione normale totale, il coefficiente di sicurezza diventa:

$$F = \frac{c'/\gamma * Z + (1 - r_u) \cos^2 \beta \tan \varphi'}{sen\beta \cos \beta}$$

Dalle due precedenti relazioni si possono trarre le seguenti considerazioni:

- il *coefficiente di sicurezza* tende a diminuire al crescere della profondità, a parità di r_u (*coefficiente di pressione neutra*) e se *c'* è diverso da zero;
- si può ricavare l'*angolo di resistenza al taglio* richiesto o mobilitato $\tan \varphi\alpha_{RICH} = \tan \beta / (1 - r_u)$ imponendo F = 1 e nel caso che la coesione c' sia nulla o che il termine $c'/\gamma z$ sia trascurabile.

Dall'ultima relazione riportata si possono trarre ulteriori conclusioni, ovvero:

- l'angolo di attrito richiesto è pari al all'angolo di inclinazione del pendio se la falda è profonda (ovvero se $r_u = 0$, per falde al di sotto della superficie di scorrimento);
- l'angolo di attrito risulta pari al doppio dell'inclinazione del pendio se la falda è presente al piano campagna (con $r_u = 0{,}5$).

In caso di pendio indefinito costituito da terreno incoerente saturo a partire dal piano campagna, ed interessato da un moto stazionario unidirezionale, con inclinazione costante α sull'orizzontale (α > β), si può dimostrare che la pressione neutra in un punto vale:

$$u = \frac{\gamma_w Z}{\left(1 + \tan \alpha \tan \beta\right)}$$

in questo caso si ottiene:

$$\tan \varphi'_{RICH} = \frac{\tan \beta}{\left[1 - \frac{\gamma_w \left(1 + \tan^2 \beta\right)}{\gamma \left(1 + \tan \alpha \tan \beta\right)}\right]}$$

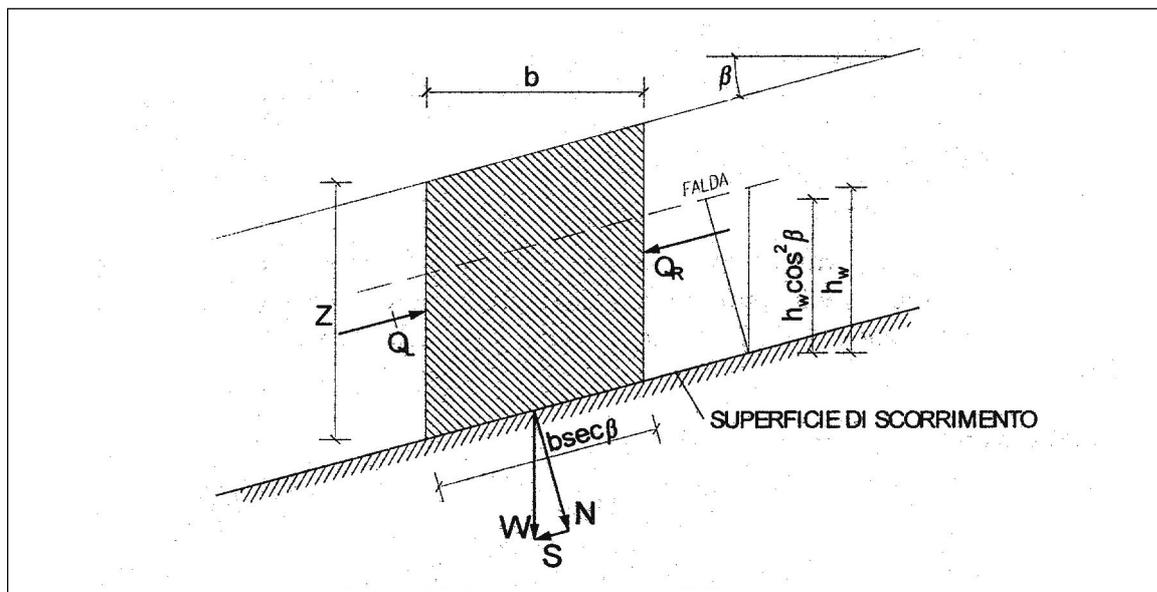
Fig. 10.8 - *Schema di pendio indefinito*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

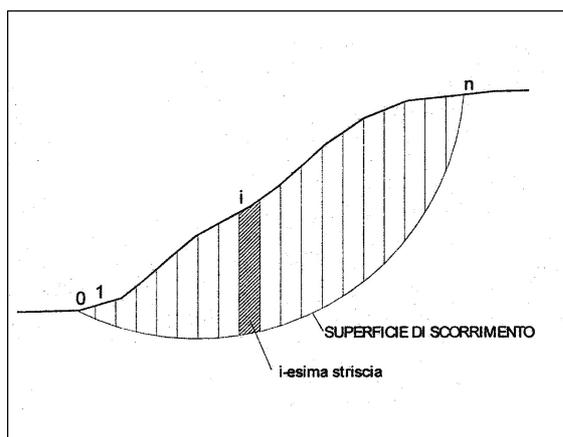
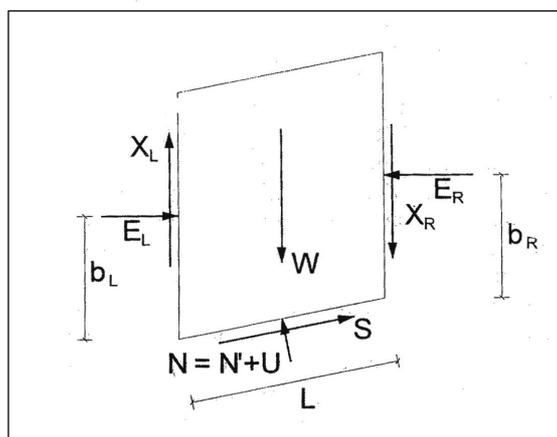
Fig. 10.9 - *Metodo delle strisce*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

Fig. 10.10 - *Sistema di forze agenti su una striscia*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

Si può ricavare anche, per α = β, l'angolo di resistenza al taglio richiesto o mobilitato:

$$\tan \varphi'_{RICH} = \frac{\tan \beta}{(1 - \gamma_w / \gamma)}$$

che risulta pari a circa il doppio di *tan* β.
Passiamo ora a metodi più complessi per il calcolo della stabilità dei pendii, tra i quali evidenziamo:

- *metodo di Fellenius*;
- *metodo di Bishop*.

Questi due approcci rientrano in quelli definiti come "metodi delle strisce", con cui si tendono a valutare, in termini discreti, lo stato tensionale all'interno della massa e lungo la superficie di scorrimento:
In generale, la massa di terreno presa in considerazione è compresa tra il piano campagna e la potenziale superficie di rottura e viene suddivisa in un numero discreto di conci o strisce verticali (**fig. 10.9**).
Con questi metodi vengono determinate le componenti normali e tangenziali delle azioni agenti lungo le basi delle strisce (**fig. 10.10**).
Ipotizziamo che le strisce siano sottili e delimitate inferiormente da basi piane; in questo caso sono note le rette di azione delle componenti normali e tangenziali delle forze lungo le stesse. Indicando con *n* il numero delle strisce, lo stato tensionale è individuato tramite 5*n*-3 grandezze incognite:

- lungo le interfacce:

n-1 componenti normali *E*;
n-1 componenti tangenziali *X*;
n-1 altezze *b* della linea di azione della componente normale *E*.

• lungo le basi:

n componenti normali N;
n componenti tangenziali S.

Il sistema di forze in esame deve risultare equilibrato. Lungo le basi il terreno deve trovarsi in condizione di rottura in presenza della resistenza a taglio ridotta, ossia di c'/F e di $\tan\varphi'/F$.
F, l'incognita, è il *coefficiente di sicurezza*.
Si possono scrivere allora $3n$ equazioni di equilibrio (2n alla traslazione ed n alla rotazione) ed n condizioni che legano, in corrispondenza di ciascuna striscia, S, N ed F:

$$S = \frac{[c'L + (N - U)\tan\varphi a]}{F}$$

dove:

L = lunghezza della base della striscia;
N = forza normale totale sulla base della striscia;
U = risultante della pressione neutra lungo la striscia.

Purtroppo il numero delle incognite supera quello delle equazioni e, di conseguenza, il problema risulta indeterminato. Tra i molteplici metodi delle strisce con cui si possono risolvere i problemi sopra accennati, si possono riportare, a titolo d'esempio, il *metodo di Fellenius* ed il *metodo di Bishop*, che risultano ampiamente impiegati nella corrente pratica progettuale.

10.8.2.1 Metodo di Fellenius
Il *metodo di Fellenius* viene applicato adottando superfici di scorrimento a generatrice circolare ed ipotizza che le forze di interfaccia possano essere trascurate, perché parallele alla base di ogni striscia. Lo sforzo normale agente sulla base di ciascuna striscia viene determinato imponenedo la condizione di equilibrio alla traslazione nella direzione normale alla base stessa, risultando pari (Sacchetti, Ghinelli, 2000, in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000):

$$N = W \cos\alpha$$

Lo sforzo tangenziale, in base alla condizione di rottura, risulta pari a:

$$S = \frac{[c'L + (N - U)\tan\varphi a]}{F}$$

Imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione intorno al centro del cerchio:

$$\sum W sen\alpha = \sum S$$

si perviene alla nota espressione del coefficiente di sicurezza:

$$F = \frac{\sum[c'L + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi a]}{\sum W sen\alpha}$$

Poiché il termine $(W\cos\alpha - uL)$ può risultare negativo, è stato proposto un differente modo per calcolare lo sforzo normale effettivo, alleggerendo il peso W della sottospinta $(uL\cos\alpha)$. Si ha pertanto la seguente espressione del coefficiente di sicurezza:

$$F = \frac{\sum[c'L + (W - uL\cos\alpha)\cos\alpha\tan\varphi']}{\sum W sen\alpha}$$

10.8.2.2 Metodo di Bishop
Questo metodo rappresenta un'evoluzione del *metodo di Fellenius*.
Lo sforzo normale agente sulla base di ogni striscia viene determinato imponendo la condizione di equilibrio alla traslazione verticale; esso risulta pari a:

$$N = \frac{[W + \Delta X - c'L sen\alpha / F + uL\tan\varphi' sen\alpha / F]}{m\alpha}$$

dove:

$m\alpha$ = $\cos\alpha + (sen\alpha \tan\varphi')/F$;
$\Delta X = X_R - X_L$ = differenza fra le forze tangenziali d'interfaccia.

Lo sforzo tangenziale è dato dall'espressione:

$$S = \frac{[c'L + (N - U)\tan\varphi']}{F}$$

Il coefficiente di sicurezza è determinato nello stesso modo del *metodo di Fellenius*, imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione intorno al centro del cerchio:

$$\sum W sen\alpha = \sum S$$

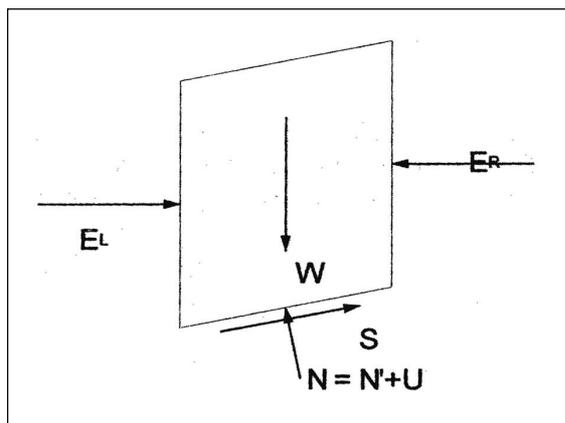
Sostituendo si perviene alla seguente espressione implicita del coefficiente di sicurezza:

$$F = \frac{\sum[((W + \Delta X - uL\cos\alpha)\tan\varphi' + c'L\cos\alpha)][1/m\alpha]}{\sum W sen\alpha}$$

Bischop notò che per variazioni anche notevoli della distribuzione delle X il coefficiente di sicurezza oscillava in un campo molto ristretto (pari all'1%), pertanto propose per i problemi tecnici, di trascurare le forze tangenziali d'interfaccia. Il metodo prende il nome di "Bishop semplificato" (**fig. 10.11**).
Poiché $m\alpha$ è funzione del coefficiente di sicurezza, il metodo deve ricercare F in modo iterativo. Sono sufficienti in genere 4 ÷ 5 iterazioni per raggiungere la convergenza.

10.8.3 Influenza della vegetazione sulla stabilità dei versanti

Il terreno rinforzato dalle radice si comporta come un materiale composito nel quale fibre elastiche con valori relativamente alti di resi-

Fig. 10.11 - *Ipotesi del metodo di Bishop semplificato*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

stenza a trazione sono inglobate in una matrice di suolo con valori più bassi (Waldron, 1977) e quindi quasi plastico (Gray, Leiser, 1982).
L'azione esercitata dalle radici è duplice: da un lato vi è la resistenza a trazione loro propria, dall'altro la loro aderenza al terreno circostante, lungo la superficie di contatto, che si traduce con la prima in un incremento di resistenza al taglio del terreno così rinforzato (Puglisi, 2000).
La *resistenza al taglio* è un sistema di forze che si oppone allo scorrimento reciproco delle particelle di un corpo.
Non dipende dalle dimensioni dei corpi a contatto e si indica (convenzionalmente) con il simbolo τ, mentre si esprime in *kPa*. Tale tensione è proporzionale alla forza unitaria σ che spinge le particelle una contro l'altra e alla resistenza d'attrito $tan\varphi$ che si sviluppa tra i granuli essendo φ l'angolo d'attrito interno del materiale.
Se questo è coerente compare anche una resistenza unitaria aggiuntiva che si chiama *coesione c*, che agisce anche a pressione nulla ($\sigma = 0$).
Nelle relazioni che esprimono la resistenza al taglio del terreno, Waldron (1977) ha introdotto una *pseudo-coesione* ΔS per tenere conto del contributo di resistenza fornito dalle radici incorparate nel terreno.
Partendo dall'*equazione di Coulomb* si avrà:

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi$$

Terzaghi la modificò in termini di sforzi efficaci:

[1] $$\tau = c' + \sigma' \tan\varphi'$$

dove

[2] $$\sigma' = \sigma - u$$

essendo

σ = tensione normale totale;
u = pressione interstiziale;
c' = coesione;
φ' = angolo d'attrito interno.

con gli ultimi due parametri che competono allo scheletro solido.
Nel modello ideato da Waldron (1977), al secondo membro della [2] compare il termine ΔS, che esprime l'incremento di resistenza al taglio del terreno dovuto alle radici, con unità di misura uguali alla τ, alla c e al σ.
Il modello di Waldron fu ripreso da Gray e Leiser nel 1982, per dimostrare come la deformazione della radice nella zona di taglio mobilita una resistenza a trazione nella fibre, che si traduce in un incremento della resistenza al taglio del terreno dato da:

[3] $$\Delta S = t_R\ [\cos\theta \tan\theta + \text{sen}\,\theta]$$

in cui:

θ = rappresenta l'angolo di distorsione delle radici nella zona di taglio;
t_R = indica la resistenza media a trazione delle radici per unità di area del terreno.

Ovvero:

[4] $$t_R = T_R\ (A_R/A)$$

in cui:

T_R = resistenza unitaria media a trazione delle radici;
A_R/A = rapporto tra l'area della sezione trasversale delle radici e l'area della sezione di terreno interessata dalle radici.

Da osservazioni sperimentali è stato osservato che i valori nell'espressione entro parentesi della [3] possono assumere con buona aprossimazione un valore medio pari a 1,2 (Puglisi, 2000).
Per valutare la pseudo-coesione da introdurre nella equazione [2] allorché si vogliono eseguire verifiche di stabilità di scarpate tenendo conto del contributo di resistenza al taglio offerto dalle radici, occorre conoscere il valore di T_R della formula [4] per le radici delle specie arboree o arbustive esistenti o da impiegare in un determinato sito (Puglisi, 2000).
Si consiglia, per ulteriori approfondimenti sull'argomento, di consultare i paragrafi relativi agli effetti della vegetazione sull'erodibilità del materiale, sulle forze di taglio, sulle pressioni interstiziali, sui parametri di resistenza al taglio e gli effetti sulla stabilità dei singoli alberi, validi, quindi, non solo in ambito idraulico, ma anche in caso di versanti in erosione.

10.8.4 Dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica: sollecitazione e tensione

Per poter introdurre in maniera semplice i concetti di sollecitazione e di tensione, si può prendere in esame una trave soggetta ad un sistema di forze equilibrato, ovvero verificante le equazioni cardinali della Statica.
Si immagini di separare la trave in due parti V_1 e V_2 mediante un piano Π (**fig. 10.12**), e di con-

siderarne una (ad esempio, la V_2). Questa porzione isolata ed esaminata non risulterà più in equilibrio: per ripristinarlo, secondo il cosiddetto *principio di Cauchy,* basterà applicare nel baricentro della sezione *S* le *azioni risultanti* che, prima di effettuare la sconnessione, la parte V_1 esercitava sullaV_2. È bene evidenziare che tali azioni dipendono dalla giacitura del piano Π scelto per realizzare il taglio della trave.

Facendo riferimento alla **figura 10.13** (sezione S ortogonale all'asse X_3 della trave, le azioni risultanti possono essere scomposte in:

- *forza normale* $\underline{N}$, diretta lungo l'asse X_3 *e* perpendicolare alla sezione *S*;
- *forza di taglio* $\underline{T}$, agente nel piano contenente la sezione *S*;
- *momento flettente* $\underline{M}_f$ ortogonale all'asse X_3 (dunque la coppia flettente è contenuta in un piano passante per l'asse della trave);
- *momento torcente* $\underline{M}_t$, diretto lungo l'asse X_3 (la coppia torcente agisce nel piano contenente la sezione *S*).

Le forze appena elencate sono intese come sollecitazioni che danno conto degli sforzi risultanti sopportati localmente, sezione per sezione, dalla trave (Sacchetti, Ghinelli, 2000 in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000).

Le sollecitazioni presenti sulla sezione *S* della porzione V_2 sono uguali e contrarie a quelle agenti sulla sezione *S'* appartenente a V_1 (**fig. 10.14**), per il principio di azione e reazione.

Riprendiamo in esame la trave V_2 e concentriamo l'attenzione sull'areola elementare ΔS, centrata nel punto *P* della sezione *S* (**fig. 10.12**). Siano ΔF e ΔM rispettivamente la forza e la coppia risultanti agenti su ΔS, che venivano esercitate su tale areola da V_1 prima di dare

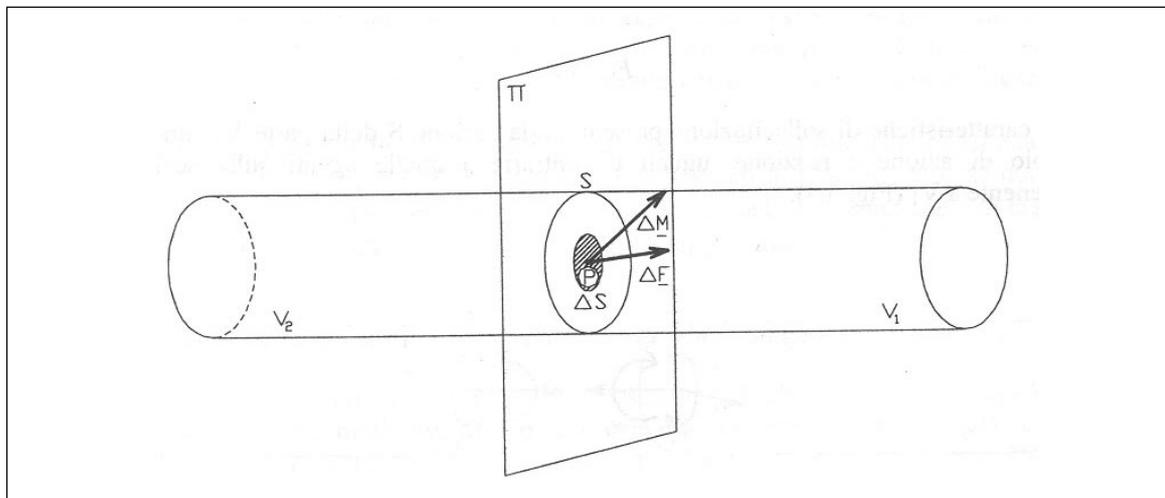
Fig. 10.12 - *Sezione di una trave*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

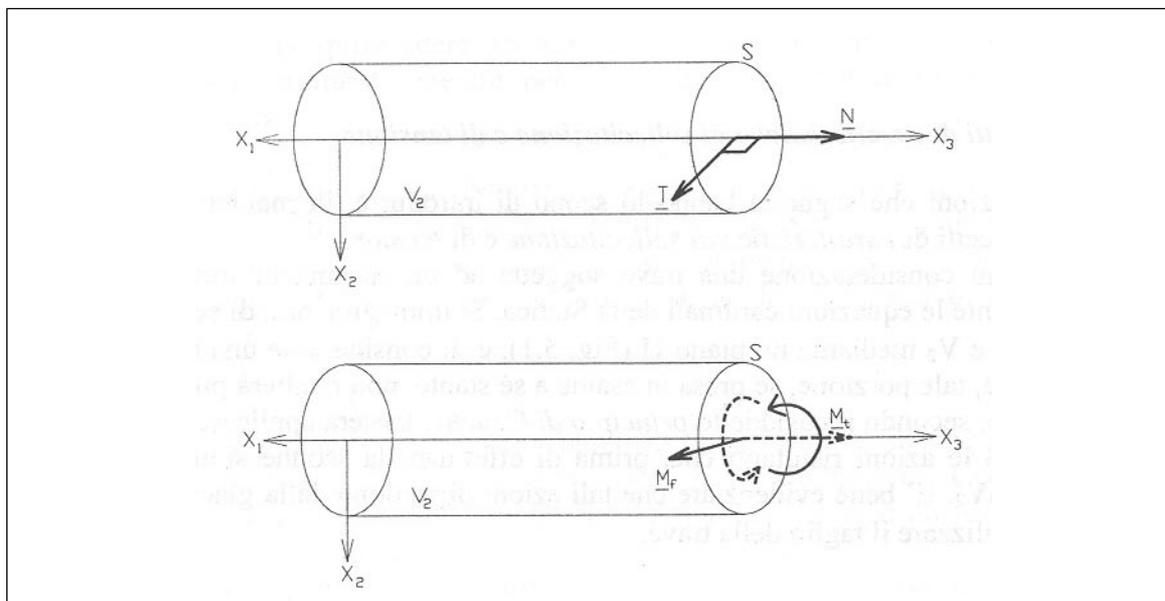
Fig. 10.13 - *Azioni risultanti dalla sezione ortogonale all'asse della trave*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

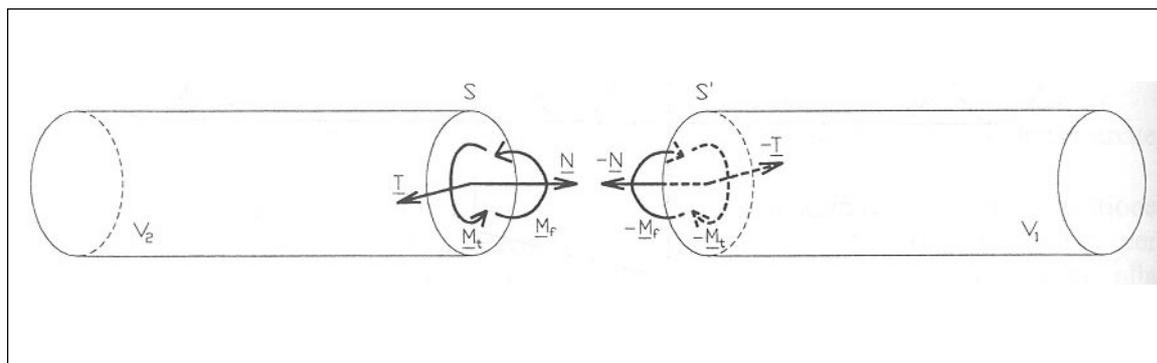
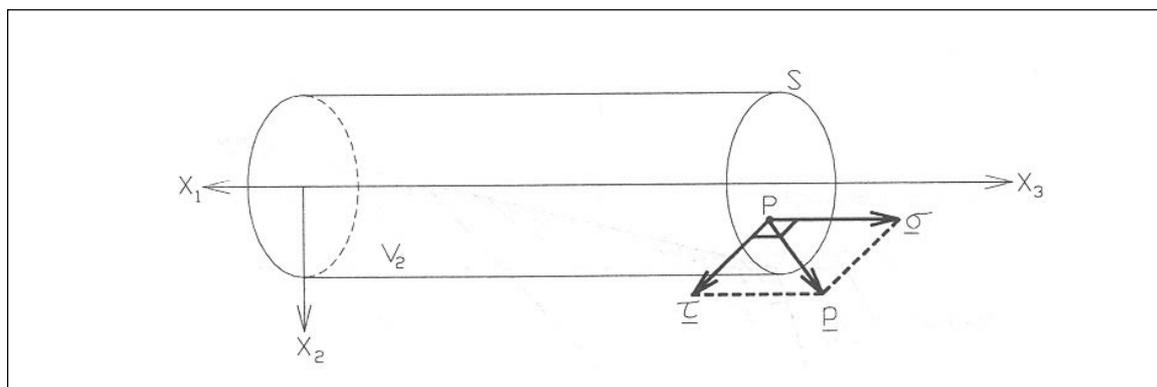
Fig. 10.14 - *Azioni risultanti dalla sezione ortogonale all'asse della trave*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

Fig. 10.15 - *Tensione agente in un punto di una trave*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

luogo alla scissione. Ammettiamo che al tendere a zero dell'areola ΔS, tendano a zero anche ΔF e ΔM e che esistano determinati e finiti i seguenti limiti:

$$\lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = p \qquad \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta M}{\Delta S} = 0$$

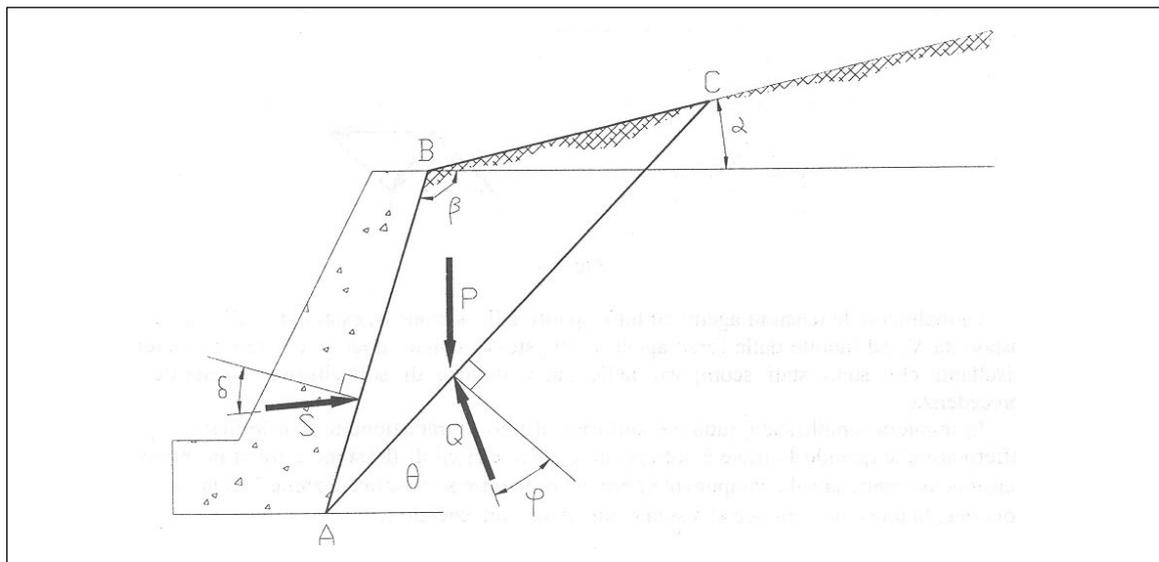
Il vettore $\underline{p}$ prende il nome di *tensione* nel punto P sul piano Π ed ha le dimensioni di una pressione (N/m^2). Questa tensione dipende sia dal punto P sia dalla giacitura del piano secante Π. L'esistenza dei limiti non può essere dimostrata, tuttavia la definizione di tensione ricavata costituisce un concetto la cui efficacia è avvalorata dai notevoli risultati raggiunti con i metodi che su di essa trovano fondamento (Sacchetti, Ghinelli, 2000 in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000).
La tensione $\underline{p}$, agente nel generico punto P, può essere scomposta nella componente $\underline{\sigma}$, ortogonale alla sezione S, e nella componente $\underline{T}$, tangenziale alla stessa sezione (**fig. 10.15**).
Le tensioni agenti su tutti i punti della sezione S, esercitate dalla porzione asportata V_1 ed indotte dalle forze agenti su V_1 stessa, danno luogo alle forze e ai momenti risultanti che sono stati scomposti nelle sollecitazioni descritte in precedenza. Si può affermare, infine, che quando la trave è sottoposta a sollecitazioni di flessione e forza normale la tensione ammette la sola componente normale σ, mentre se la sollecitazione e di taglio o di torsione, la tensione si riduce alla sola componente tangenziale T.

10.8.4.1 Cenni sulla spinta delle terre contro le opere di sostegno

Vengono usualmente definite "spinte", le azioni che un terreno esercita su un ostacolo che gli impedisce di raggiungere la sua configurazione naturale.
Per determinare i coefficienti di sicurezza relativi alla stabilità di una costruzione, è importante stimare:

- la *spinta attiva*: è il valore all'estremo dell'equilibrio, ovvero quando risultino incipienti i movimenti che precedono il collasso dell'opera;
- la *spinta passiva*: con questo termine ci si riferisce all'estremo dei valori assunti dalla reazione del terreno, nel caso in cui sia la costruzione a premere contro quest'ultimo.

Il problema della determinazione della spinta di un terreno incoerente sulle opere di sostegno fu studiato da Coulomb (1776): questi prese in esame lo stato di equilibrio del cuneo rigido di terra *ABC* (**fig. 10.16**), che in seguito ad

Fig. 10.16 - *Descrizione delle forze che costituiscono la spinta passiva di un terreno incoerente su opere di sostegno*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

un cedimento in avanti del muro si stacca dalla restante massa del terrapieno scivolando lungo la superficie *AC*, supposta piana, e lungo lo stesso paramento *AB*.
Nelle condizioni di equilibrio limite, cioè di moto incipiente del cuneo di terreno, la reazione *Q* della superficie di scorrimento risulta inclinata, rispetto alla perpendicolare alla superficie, dell'angolo di attrito interno φ, mentre la reazione *S* offerta dal paramento, trascurando fenomeni di adesione, è inclinata rispetto alla normale al paramento stesso di un angolo δ di attrito tra parete e terreno (**fig. 10.16**).
Per l'equilibrio del prisma, al variare dell'inclinazione θ della sezione *A - C* di scivolamento, mutano la direzione ed il modulo della reazione *Q* ed il modulo (ma non la direzione) della spinta *S*. Indicato con S_a il massimo valore assunto da *S* (e con θa l'inclinazione della corrispondente superficie di scorrimento), l'*equilibrio è possibile se il muro può garantire almeno la spinta* S_a.
Si è in condizioni di equilibrio limite per la sola superficie inclinata di θa, nel caso in cui *S* sia pari a S_a, mentre per ogni altro angolo θ, *S* risulta inferiore ad S_a. Dunque, l'inclinazione θa individua la superficie di scorrimento, mentre S_a rappresenta, per quanto detto inizialmente, la *spinta attiva*.
Il problema in questione può essere risolto per via grafica utilizzando il poligono delle forze: si perviene alla soluzione per tentativi, variando successivamente l'inclinazione della superficie *A - C*, in modo da valutare, grazie ai vari poligoni di equilibrio ottenuti, la spinta massima S_a.
H. Müller Breslau ha esteso in seguito (1924), per via analitica, il procedimento dell'equilibrio limite di Coulomb ricavando, per la spinta attiva S_a, la seguente espressione:

$$S_a = \frac{1}{2}\gamma_t H^2 K_a$$

con K_a (*coefficiente di spinta attiva*) uguale a :

$$K_a = \frac{sen^2(\beta+\varphi)}{sen^2\beta \cdot sen(\beta-\delta)\left[1+\sqrt[2]{\frac{sen(\varphi+\delta)\cdot sen(\varphi-\alpha)}{sen(\beta-\delta)\cdot sen(\beta+\alpha)}}\right]^2}$$

dove:

H = altezza del paramento;
γ_t = peso specifico naturale del terreno.

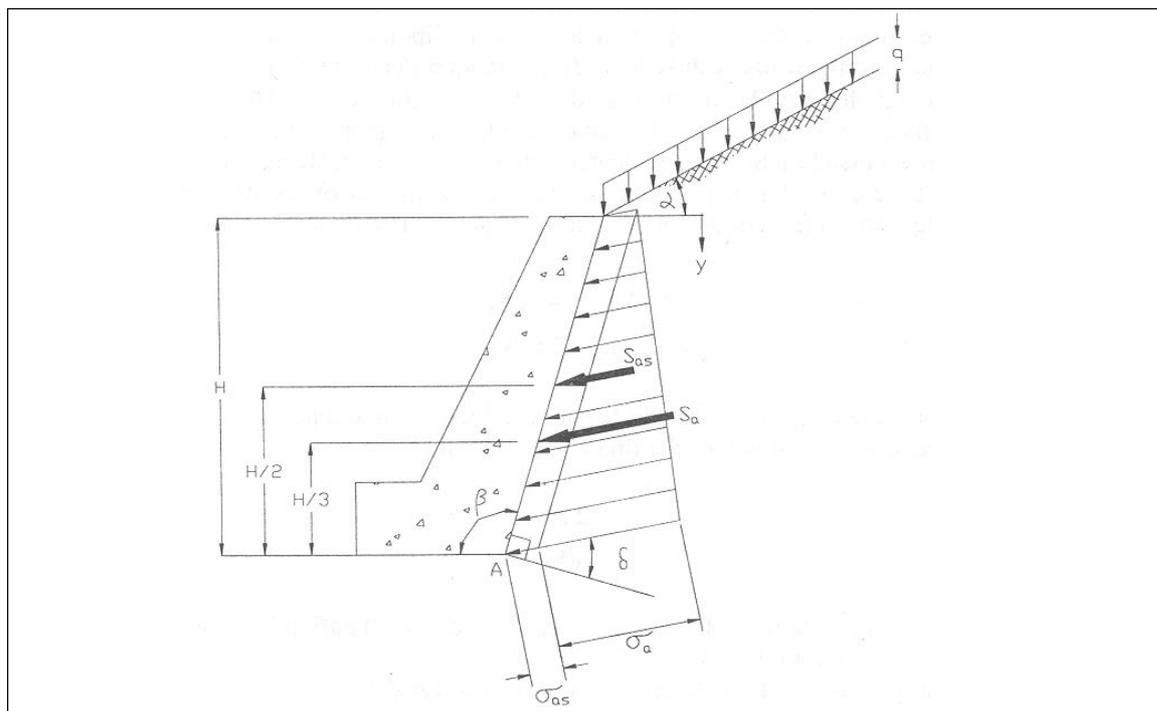
La spinta complessiva ad una certa profondità *y* può essere calcolata sostituendo ad *H* la quantità *y* nell'espressione di S_a sopra riportata. Tale spinta varia con legge parabolica al mutare di *y*, dunque il diagramma delle pressioni dovute al solo peso del terreno presenta un andamento lineare (**fig. 10.17**) e la pressione attiva alla generica profondità *y* può essere valutata mediante la seguente relazione:

$$\sigma_a = \gamma_t y K_a \frac{sen\beta}{\cos\delta}$$

Se sul terrapieno è presente il sovraccarico q (**fig. 10.17**), caratterizzato da una distribuzione uniforme infinitamente estesa, occorre aggiungere all'espressione della S_a, il termine:

$$S_{as} = qh\frac{sen\beta}{sen(\alpha+\beta)}\cdot K_a$$

mentre a quella della pressione δ_a *si* deve sommare la quantità:

Fig. 10.17 - *Descrizione delle forze che costituiscono la spinta passiva di un terreno incoerente su opere di sostegno dove è presente un sovraccarico "q"*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

$$\sigma_{as} = qK_a \frac{sen^2\beta}{\cos\delta \cdot sen(\alpha+\beta)}$$

L'angolo di attrito δ fra parete e terreno cambia segno, rispetto a quanto illustrato nella **figura 10.17**, nel caso in cui sia il muro, a causa di un eventuale ulteriore cedimento, a muoversi verso il basso rispetto al terrapieno, dunque occorre sempre tenere presenti i possibili reali spostamenti relativi fra terreno ed opera di sostegno. L'azione risultante dovuta al solo peso del terreno passa per il punto *O*, che è posto ad una distanza *H/3* dall'orizzontale per il punto *A*, mentre la risultante dovuta al sovraccarico *q* dista *H/2* da tale retta di riferimento.
Prendiamo in considerazione la *spinta passiva*, ovvero il valore massimo che può assumere l'azione laterale applicata al terreno: con riferimento alla **figura 10.16**, si ha che le componenti tangenziali alle superfici di scivolamento delle forze *Q* e *S* devono risultare in grado di contrastare il movimento verso l'alto (indotto dall'azione spingente della costruzione) del prisma di terreno; dunque il segno degli angoli φ e δ deve risultare opposto a quello illustrato.
Per la spinta passiva S_p si possono ricavare espressioni analoghe a quelle relative alla S_a:

$$S_p = \frac{1}{2}\gamma_t H^2 K_p$$

$$K_p = \frac{sen^2(\beta+\varphi)}{sen^2\beta \cdot sen(\beta-\alpha)\cdot\left[1-\sqrt{\frac{sen(\varphi+\delta)\cdot sen(\varphi-\alpha)}{sen(\beta-\delta)\cdot sen(\beta+\alpha)}}\right]^2}$$

con:

K_p = coefficiente di spinta passiva.

Per la valutazione di K_p si possono consultare particolari diagrammi o tabelle di valori ottenuti facendo riferimento a superfici di rottura curvilinee (ad esempio, a spirale logaritmica): infatti l'ipotesi di una superficie di scivolamento piana porta ad una valutazione di K_p, dunque della spinta passiva S_p che, specie per alti valori dell'angolo di attrito δ, differisce sensibilmente dai risultati che si otterrebbero considerando superfici di scivolamento non piane: in particolare si valuterebbero per eccesso K_p e S_p, fatto evidentemente non a favore di sicurezza.
In terreni coesivi, con piano di campagna orizzontale, parete di sostegno verticale e attrito fra terreno e muro nullo, valgono le seguenti relazioni per le tensioni σ_a e σ_p:

$$\sigma_a = \gamma_t y K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

$$\sigma_p = \gamma_t y K_p - 2c\sqrt{K_p}$$

dove *c* rappresenta la resistenza dovuta alla coesione del terreno in esame. Dalla prima espressione si può notare che fino alla profondità:

$$y_o = \frac{2c}{\gamma_t \sqrt{K_a}}$$

la tensione σ_a risulta di trazione e, di conseguenza, per una altezza pari a $2y_0$ il diagramma delle spinte risulta equilibrato (**fig. 10.18**).
Nella teoria un fronte di terreno verticale di altezza $2y_0$ potrebbe rimanere in equilibrio senza supporti esterni, ma nella realtà le suddette tensioni di trazione originano tutta una serie di fessure che riducono il valore di tale altezza critica.
In presenza di un'opera di sostegno, fino ad una profondità y_0, il terreno non comprime il muro ma tende al contrario a staccarsene, favorendo così potenziali infiltrazioni d'acqua che potrebbero indebolire la coesione stessa.
Se l'opera di sostegno interagisce con la falda acquifera, occorre tenere presente, anche il valore della spinta idraulica, in relazione alle condizioni statiche o dinamiche (queste ultime legate a fenomeni filtrazione) che si possono instaurare nel terrapieno.
La procedura di calcolo, in questo caso, non si modifica rispetto a quanto riportato finora per la parte di terreno sopra la falda, mentre per la parte immersa occorre scindere il contributo dovuto all'acqua da quello dovuto al terreno (valutato facendo riferimento al peso di volume efficace y', dato dalla differenza del peso specifico del terreno a saturazione y_{sat} con il peso specifico dell'acqua y_w).
Le verifiche di stabilità esterna a cui sottoporre sia i manufatti a gravità, sia opere impiegate nell'Ingegneria Naturalistica (palificate semplici e doppie di sostegno, briglie, gabbionate, ecc.), sono principalmente tre:

- verifica al ribaltamento;
- verifica allo slittamento;
- verifica della capacità portante.

Con particolare riferimento all'esempio illustrato nella **figura 10.19** si ha che il momento stabilizzante totale (rispetto al punto *R* di eventuale rotazione per ribaltamento) è dato dalla somma dei momenti dovuti alla componente verticale della spinta *Sv* ed al peso dell'opera.
Il momento ribaltante (sempre rispetto al punto *R*) è generato dalla componente orizzontale di S_a, e comprende, eventualmente, anche quello dovuto alla spinta idrostatica o ad altre forze che tendono a far ribaltare in avanti l'opera.
La verifica al ribaltamento consiste nell'assicurarsi che il rapporto fra *momento stabilizzante* e *momento ribaltante* totali risulti superiore al fattore di sicurezza F_r generalmente assunto pari a 1,5:

$$\frac{S_v \cdot b + P \cdot a}{S_0 \cdot c} \geq F_r$$

affinché l'opera risulti stabile allo slittamento, l'attrito presente al contatto fondazione terreno deve contrastare efficacemente la componente orizzontale della spinta S_a; in particolare deve risultare che:

$$\frac{(P + S_v) tg\delta}{S_0} \geq F_s$$

con F_s *coefficiente di sicurezza allo slittamento* (assunto pari a 1,5) e δ angolo d'attrito fra fondazione e terreno.
Occorre infine verificare che la fondazione abbia dimensioni adeguate, in modo tale da poter scaricare il peso dell'opera sul terreno con un coefficiente di sicurezza di 2,5 nei confronti della capacità portante limite.

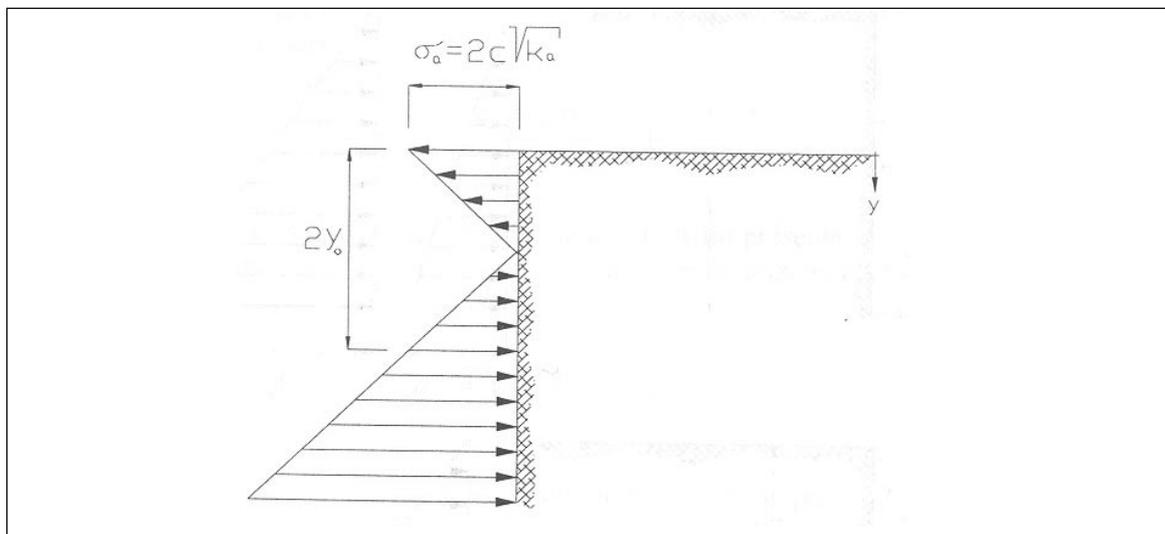
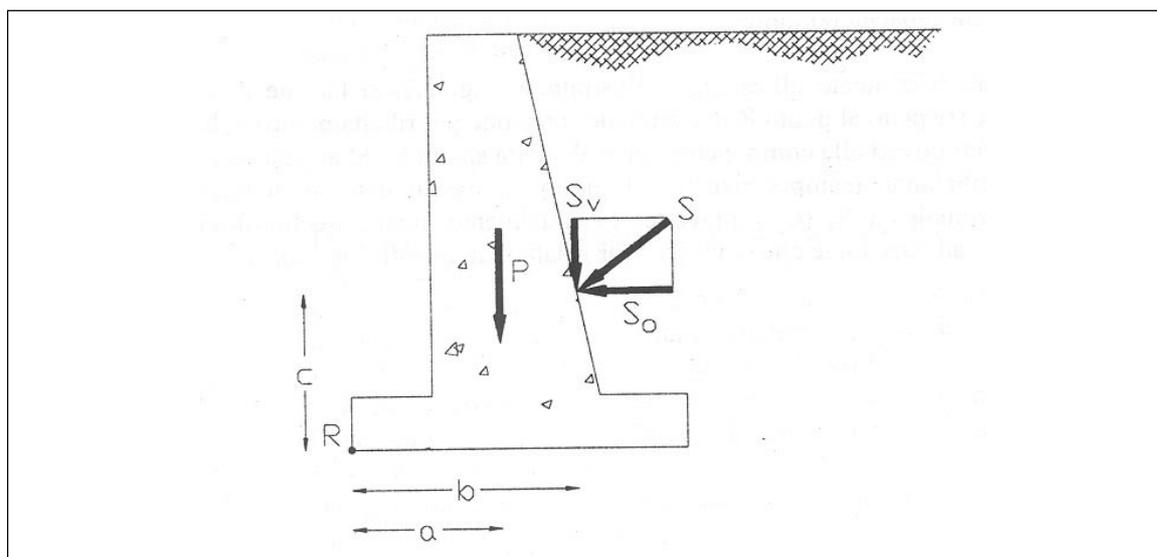
Fig. 10.18 - *Equilibrio tra le spinte del piano di campagna orizzontale, parete di sostegno verticale e attrito tra terreno e muro per una h= 2yo*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

Fig. 10.19 - *Descrizione delle forze rispetto al punto R, che identificano il momento stabilizzante e ribaltante*

Fonte: *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1*, 2000.

10.9 Pedologia

Per "suolo" generalmente si intende lo strato superficiale della crosta terrestre, che è la risultante di processi di alterazione fisico-chimica di una roccia e di decomposizione di materiali organici (Dowgiallo, 1998).
La *pedogenesi* è funzione di una serie di processi espressi dall'*equazione di Jenny*.

S(suolo) = f (cl, o, r, p, t)

in particolare:

- S = proprietà del suolo;
- cl = clima;
- o = organismi viventi, animali, vegetali, microorganismi, funghi;
- r = fattore topografico;
- p = roccia madre;
- t = tempo.

I fattori che intervengono nella pedogenesi sono diversi e dalle innumerevoli combinazioni che possono derivare si ottengono altrettante condizioni edafiche.

10.9.1 Elementi di pedogenesi

Il suolo è un sistema aperto in continuo scambio di energia e materia con i sistemi circostanti.
Nella formazione del suolo hanno grande importanza:

- i *guadagni*, che riguardano composti organici e inorganici e in cui la componente vegetale della biosfera interessa gli strati più superficiali e che va ad alimentare l'intensa attività di decompositori;
- le *trasformazioni* che riguardano il processo di alterazione della materia organica e dei minerali, la neoformazione di minerali e composti organici e le modificazioni fisiche delle rocce dovute ai processi di dissoluzione e alterazione ;
- le *traslocazioni*, che coinvolgono i composti in soluzione e in sospensione.

Il risultato di questi processi elementari è la differenziazione di strati omogenei ad andamento quasi orizzontale, detti *orizzonti*, di spessore variabile.

10.9.2 Stratificazione del suolo

Effettuando una sezione verticale di un suolo si osserva che esso è costituito da più strati detti *orizzonti*. Maggiore è il grado di evoluzione altrettanto numerosi saranno gli orizzonti, per cui i suoli meno evoluti possono essere privi di qualche orizzonte. Osservando un profilo di un suolo dall'alto verso il basso si nota che è caratterizzato da:

- *orizzonte O*: si suddivide in due sub-orizzonti denominati *O1* e *O2*. Il sub-orizzonte *O1* è detto anche *lettiera* costituita da residui animali e/o vegetali indecomposti e facilmente riconoscibili, ove inizia la fase di degradazione della materia organica, per cui si avvia il processo di umificazione e di mineralizzazione. Se prevale il primo provoca la lisciviazione delle basi e l'acidificazione del suolo, soprattutto a carico del sottostante strato *A*. Se prevale la mineralizzazione si verifica una maggiore produttività della vegetazione. Il sub-orizzonte *O2* contiene materiale organico proveniente dal sub-orizzonte sovrastante, non è più riconoscibile la derivazione dei resti, la decomposizione è più avanzata;
- *orizzonte A*: detto anche *orizzonte umico*, in quanto è sede di intensa attività microbica grazie alla quale si completa la mineralizzazione, difatti la sostanza organica umificata si lega alla componente minerale del suolo;

dal punto di vista cromatico presenta colore scuro;
- *orizzonte E*: denominato *eluviale* subisce la lisciviazione degli idrossidi solubili di *Fe* e *Al*. Restano soltanto sostanze insolubili come SiO_2. Dal punto di vista granulometrico restano solo particelle delle dimensioni delle sabbie e dei limi;
- *orizzonte B*: anch'esso è di tipo minerale, denominato *illuviale* poiché è sede di accumulo delle sostanze provenienti dagli orizzonti soprastanti. Esso si suddivide nei sub-orizzonti *B1*, *B2*, *B3*. I sub-orizzonti *B1* e *B3* hanno caratteri intermedi tra l'orizzonte a cui appartengono e quelli vicini, mentre *B2* contiene argille e materia organica proveniente dagli orizzonti soprastanti;
- *orizzonte C*: è costituito da frammenti di detrito provenienti dalla roccia in posto, l'alterazione subita dai frammenti è di tipo fisico;
- *orizzonte R*: la roccia in posto che non ha subito ancora alcuna alterazione.

Questa descrizione del suolo è riferibile ad un suolo evoluto, alcune volte può mancare uno strato a causa dell'erosione oppure della non completa evoluzione, come nei casi dei suoli con profilo *AC*, oppure dei suoli con profilo invertito come *BAC* in quanto soggetti alla risalita dell'acqua.

10.9.3 Le fasi del suolo

Esso è costituito da tre differenti fasi:
- *liquida*;
- *gassosa;*
- *solida*.

10.9.3.1 Fase liquida

Vettore importante del suolo, veicola le differenti sostanze e soluti tra i vari orizzonti, oltre che rappresentare una fondamentale fonte di approvvigionamento per le piante. La componente liquida del terreno è rappresentata dall'acqua in esso contenuto, deriva dalle precipitazioni meteoriche, e da afflussi laterali, oppure dalla falda sottostante. A causa delle precipitazioni, l'acqua attraverso i pori raggiunge la falda sottostante, essa discende per gravità alimentandola.

L'acqua occupa gli spazi al di sotto degli 8 μ, mentre quelli di diametro maggiore sono occupati dall'aria; inoltre è presente sotto forma di acqua di cristalizzazione, all'interno delle strutture dei minerali. Quando l'acqua è legata ai sali è detta *acqua igroscopica*. Se occupa micropori con diametro inferiore a 2 μ non è disponibile per le piante. È disponibile invece quando è presente nei micropori maggiori di 2 μ; o dalle falde sotterranee, dalle quali può risalire per ascensione capillare.

L'acqua che alimenta la falda è detta gravitativa, mentre quella trattenuta dai micropori è detta capillare. Il suolo contiene grandissime riserve di acqua: se si considera che i pori costituiscono circa il 44% ÷ 60% del suo volume, si può facilmente calcolare che , per 1 ha di superficie e 1 m di spessore, un terreno trattiene ben 4.500 ÷ 6.000 m^3 di acqua (Dowgiallo, 1998).

10.9.3.2 Fase gassosa

All'interno dei suoli è presente anche l'aria, che tende ad occupare gli spazi vuoti lasciati liberi dall'acqua. A livello di rizosfera si svolgono i cosiddetti scambi gassosi, difatti sono presenti animali, le radici delle piante, la materia organica in decomposizione.

La composizione dell'aria del suolo è la stessa di quella atmosferica; varia invece la quantità degli stessi componenti. Per quanto riguarda l'azoto è pressoché identica, l'ossigeno è di meno, mentre risulta maggiore l'anidride carbonica. Quest'ultima viene prodotta in eccesso in quanto prodotto della respirazione degli organismi del terreno e deriva anche dalla demolizione della sostanza organica. Il terreno non deve essere mai compatto, è fondamentale la sua aerazione, in modo tale da favorirne l'evoluzione e la vita.

10.9.3.3 Fase solida

La fase solida è rappresentata dalle argille, sabbie, limi; la fase liquida ha come solvente l'acqua, che contiene tutte le sostanze solubili, mentre la fase gassosa è principalmente rappresentata dal vapore acqueo, dalla CO_2 e da O_2.

La fase solida si compone di pietre, particelle con diametro di 2 mm, e tra fine con diametro minore di 2 mm, rappresentato dalla terra fine, costituita sua volta da sabbia, limo e argilla.

10.9.4 La componente organica del suolo

Particolare attenzione deve essere riferita ai procedimenti riguardanti la mineralizzazione e l'umificazione, in entrambe i casi il risultato è rappresentato da sostanze come NH_3, NO_3, NO_2, PO_4, SO_4, sono macro- e microelementi fondamentali per lo sviluppo delle piante. La mineralizzazione è molto più veloce dell'umificazione, ed è accelerata dalle alte temperature. L'umificazione è più lenta, prevale uno stadio intermedio colloidale rappresentato da prodotti più o meno solubili come aminoacidi, proteine, ecc. che tendono a formare l'*humus*, più refrattario alla degradazione rispetto alla materia organica; la cui superficie degli aggregati umici è ricoperta da cariche negative, motivo per cui è in grado di unirsi a cationi come Ca^{2+}, K^+, NH^{4+}, Mg^{2+}; inoltre, le macromolecole umiche sono in grado di legare l'acqua facendo aumentare così il contenuto idrico del suolo.

L'*humus* è in grado anche di unirsi alle particelle di argilla, conferendo così maggiore stabilità a questi tipi di terreni suscettibili all'imbibizione. Successivamente l'*humus* viene sottoposto a lenta mineralizzazione i cui prodotti si legano alla componente minerale del suolo.

Un buon suolo per il 97% è costituito da sostanza inorganica e per il rimanente 3% da sostanza organica, in particolare i suoli con sostanza organica al di sotto dell'1% sono definiti *aridi*,

e la vegetazione incontra grosse difficoltà ad insediarsi. Queste informazioni di carattere generale fanno comprendere quanto sia fondamentale la protezione del suolo ad opera della vegetazione, forniscono anche valide indicazioni in fase di impianto della vegetazione. Molte volte viene utilizzato semplicemente il terreno di riporto, alcune volte viene utilizzato il cappellaccio se si tratta di recupero di cave. Senza tenere conto che questo materiale non presenta più caratteristiche umiche e chimico-fisiche idonee allo sviluppo della vegetazione, per cui si rende necessario l'utilizzo di ammendanti, concimi, ecc., per migliorarne anche la frazione umica. Dai monitoraggi effettuati su impianti di Ingegneria Naturalistica è stato osservato che la comparsa della pedofauna si verifica dopo circa 10 anni dall'impianto.

L'*humus* è di fondamentale importanza per la fertilità dei terreni, non solo di tipo agrario, ma anche di tipo forestale, ecc. La sua presenza incide notevolmente sulle caratteristiche chimico-fisiche dei suoli, è presente sotto diverse forme e diversi stati di decomposizione.

I residui organici (parti di vegetali, animali, microorganismi) restano sul suolo ove cominciano ad essere decomposti, ad esempio le foglie, rami, radici delle piante vengono immediatamente colonizzati da funghi che avviano il complesso della degradazione. A questo complesso di azioni partecipa anche la pedofauna, con la funzione di sminuzzare i frammenti più grossolani, rendendoli più fini ed aumentando così la superficie utile per le continuazione della decomposizione. A distanza di poche settimane vengono allontanate dai residui organici sostanze come i carboidrati più semplici. Successivamente si verifica la decomposizione anche della lignina. Quindi si arrivano ad ottenere le biomolecole fondamentali per la costruzione delle cellule come amminoacidi, mono- e polisaccaridi, ecc.

A questo punto si è arrivati alla costituzione dell'*humus* con la mineralizzazione finale.

L'*humus* è costituito da acidi organici di diversa formula chimica, sono caratterizzati dalla presenza di gruppi funzionali -OH, -COOH che si legano con cationi come Ca, Mg; K, NH^{4+}. Questi cationi legandosi all'*humus* sono disponibili per l'assorbimento radicale ad opera delle piante.

Le particelle hanno granulometria inferiore a 2 μ per cui concorrono a formare la componente dispersa della soluzione colloidale del terreno, aumentando la capacità di ritenzione idrica del terreno.

All'interno del terreno la componente umica è stratificata e partendo dalla superficie del terreno si hanno:

- *lettiera*, costituita da foglie ed altri parti delle piante che si depositano sul suolo, sono soggetti ad una lieve degradazione, i resti sono facilmente riconoscibili;
- *frammenti*, la degradazione è avanzata ed i residui non sono facilmente riconoscibili;
- *humus*, con struttura granulare fine, più del 70%, di colore scuro.

Vi sono differenti tipi di *humus* in rapporto alla degradazione che la materia organica subisce:

- *Mor*: è una forma di *humus* che occupa notevole spessore in superficie poiché la sostanza organica è soggetta a lenti processi di degradazione, per cui non riesce nemmeno a penetrare nel suolo;
- *Moder*: è una forma di *humus* intermedia, la sostanza organica è soggetta a processi degradativi mediamente veloci, per cui si verifica un certo accumulo sia in superficie che nel sottostante *orizzonte A*;
- *Mull*: in questo caso la degradazione della sostanza organica è abbastanza veloce, difatti i sub-orizzonti umici sono molto sottili per l'abbondante presenza dell'*humus* nell'*orizzonte A*.

La velocità di decomposizione della materia organica è influenzata dalla temperatura e dalla composizione dei residui organici. Aumentando le temperature vengono accelerati i processi di umificazione, difatti nei climi caldi i processi di umificazione durano poche settimane, mentre nei climi freddi si hanno dei forti rallentamenti. Nel primo caso la lettiera è sottile, mentre risulta essere più spessa nel secondo caso.

Se i residui organici sono costituiti da foglie di conifere, a causa dei rivestimenti cerosi, l'umificazione è notevolmente rallentata, mentre gli altri tipi di residui organici sono facilmente alterabili.

10.9.5 Elementi di pedologia

Le indagini di base per l'applicazione delle tecniche dell'Ingegneria Naturalistica contemplano anche studi di tipo pedologico che rivestono notevole importanza sia per le caratteristiche meccaniche che per la messa a dimora delle piante.

Il rilievo pedologico è basato sull'esecuzione e la descrizione di profilo del terreno e su anlisi fisico-chimiche.

Una volta inquadrato il contesto geologico e morfologico in cui si opera (può essere sufficiente analizzare la letteratura scientifica del settore a disposizione per quel territorio) si procede alla fotointerpretazione dell'area in modo da poter individuare preventivamente delle sub-aree omogenee dal punto di vista sia litologico che morfologico. Una volta individuate queste si passa all'effettuazione dei rilievi podologici in campagna mediante l'esecuzione di alcuni sondaggi preliminari con l'ausilio di una trivella a mano di tipo "olandese" mentre il profilo vero e proprio, che consiste nell'escavazione di una trincea (operazione molto faticosa che spesso richiede l'utilizzo di macchinari e/o parecchia mano d'opera) viene effettuato per l'acquisizione di tutti quegli elementi necessari ad un'accurata classificazione. Ogni trivellata è caratterizzata dalla compilazione di un'apposita scheda di rilevamento sulla

quale vengono annotate localizzazione, caratteristiche stazionali e caratteristiche pedologiche.

- *Localizzazione*: consiste nell'individuazione del punto di trivellata su di un'adeguata carta topografica oppure nell'indicazione delle coordinate geografiche del punto (GPS), in modo tale da poter sempre ritrovare sul terreno il punto di campionamento. Possono essere riportate altre informazioni quali comune, provincia, regione della località in cui si effettuata la trivellata, oltre a riportare l'altitudine del luogo rispetto al livello del mare.
- *Caratteristiche stazionali*: consistono nell'annotazione delle caratteristiche morfo-logiche della stazione quali la *pendenza* (rilevata con la *livelletta di Abney*), l'*esposizione* (rilevata mediante la bussola). Uno dei principali fattori che influenza i fenomeni pedogenetici è rappresentato dal *litotipo presente*, per cui è bene annotare le caratteristiche della roccia presente in posto; devono essere anche rilevati inoltre eventuali *processi geomorfologici in atto*, ossia fenomeni come l'*erosione*, la *deposizione* o la *presenza di aree soggette a fenomeni di instabilità*. Un'altra caratteristica importante è rappresentata dalla *pietrosità superficiale* e della *rocciosità* parametri che influenzano notevolmente la velocità di infiltrazione delle acque. Il quadro del rilevamento delle caratteristiche stazionali è completato dall'*annotazione dell'uso del suolo*, del *tipo di vegetazione presente* (spontanea o coltivata) e della *presenza dell'eventuale drenaggio interno* e della *profondità della falda*.
- *Caratteristiche pedologiche*: è la parte più importante del rilievo, in quanto permette la classificazione del suolo e prevede:
  - descrizione dell'intero *profilo* e degli *strati* di cui è composto;
  - individuazione del *colore* (che avviene in maniera inequivocabile utilizzando una serie di cartelle colorate in maniera standard riunite in un libretto denominate *Munsell Soil Color Charts*; i caratteri da identificare sono 3: *Hue* o tinta, *Value* o luminosità e *Chroma* o intensità di colore sia con zolle di terreno secco che con zolle di terreno umidificato in modo tale che il colore non possa imbrunirsi ulteriormente);
  - individuazione all'interno dei singoli strati di possibile presenta di *screziature* rappresentate da striature o macchie di colorazione differente con spessore e lunghezza variabile (sono più frequenti negli strati profondi del suolo con colorazione variabile dal rosso fino al blu);
  - proprietà come la ritenzione idrica, il drenaggio e l'areazione del terreno sono principalmente influenzati dalla *quantità di scheletro* altro parametro che viene monitorato e che rappresenta la quantità di particelle presenti nel profilo con dimensioni maggiori di 2 mm, inoltre riveste importanza anche la rilevazione della loro forma;
  - *tessitura,* che è un altro parametro determinato dalla dimensione delle particelle (< 2 mm), ossia sabbia, limo ed argilla (la tessitura si riferisce, in particolare, alla porzione in peso delle particelle al di sotto dei 2 mm e può essere determinata mediante l'utilizzo del cosiddetto *triangolo di Miller*, che permette di risalire alle percentuali che individuano le varie classi).

Anche i processi chimici rivestono rilevante importanza nella pedogenesi, difatti durante la trivellata vengono rilevate forma, dimensione, profondità e composizione chimica di concrezioni all'interno del profilo.
Le forme più comuni che si rinvengono sono concrezioni vere e proprie, noduli, cristalli, concentrazioni soffici, che sono principalmente costituite da carbonato di calcio, gesso, ferromanganese e cloruro di sodio.

10.9.6 Caratteristiche chimiche dei suoli

- *Capacità di scambio cationico* (o *anionico*): la nutrizione delle piante è di tipo minerale, e avviene mediante l'assorbimento in una soluzione acquosa di anioni e cationi disciolti quali PO_4, SO_4, HCO_3, Ca, Mg, Na, K, H, che, all'interno del suolo, sono legati per lo più alle particelle di argille e ai colloidi costituiti dalle sostanze umiche, tale unione-legame limita la perdita di queste sostanze per dilavamento impedendo così un veloce impoverimento del suolo.
  Nel momento in cui le piante assorbono queste sostanze ioniche vengono sostituite dallo ione H^+ disponibile nel terreno. Affinché questo avvenga nel suolo lo ione H deve essere disponibile, e la sua disponibilità influenza così il pH.
- *pH*: parametro di fondamentale importanza per la componente biotica del suolo e per la disponibilità di alcune sostanze nel terreno. Normalmente la il pH del suolo si aggira tra 6,5 e 7,5 intervallo in cui vivono contemporaneamente funghi e batteri, le variazioni di pH rendono il suolo un ambiente selettivo, difatti nei casi in cui si sposta verso l'acidità diventa selettivo in quanto riescono a sopravvivere soltanto i funghi. Inoltre, questo parametro è in grado di influenzare la solubilità di molti sali e quindi può limitare o meno la loro disponibilità nel terreno.

10.9.7 Caratteristiche fisiche dei suoli

- *Granulometria*: è il rapporto percentuale (generalmente in peso) tra le classi dimensionali delle particelle solide minerali del suolo (Sanesi, 1993). Il suolo è costituito da particelle di dimensioni o granulometria differenti, l'insieme delle particelle con diametro >2 mm viene definito *scheletro* mentre l'insieme delle particelle con diametro <2 mm viene definito *terra fine*. La terra fine è oggetto di ulteriore indagine che permette di risalire alla cosiddetta *tessitura* del terreno che rappre-

senta la percentuale della granulometria delle particelle fini.

- *Stato di aggregazione del suolo*: le particelle sia organiche che inorganiche del terreno possono riunirsi tra loro in maniere differenti, originando così diverse forme di aggregazione, con altrettanti gradi di stabilità. Ad esempio la struttura può essere: *lamellare,* quando gli aggregati sono piatti con andamento parallelo rispetto alla superficie del terreno, *prismatica* con aggregati di forma allungata o prismatica originatisi per fratturazioni di strati argillosi del terreno, *poliedrica* con aggregati aventi forma di poliedri ed infine *granulare* o *grumosa* con aggregati di forma sferoidale. In natura esistono dei suoli privi di struttura in quanto possono essere sciolti o molto compatti.
- *Porosità*: è la percentuale degli spazi vuoti presenti nel terreno per un determinato volume. Il substrato pedogenetico è attraversato da una rete di canali, lasciati da radici morte o scavati da animali, che viene occupata dall'aria, fondamentale per la respirazione della pedofauna, e dall'acqua in cui sono sciolte differenti sostanze.
  I pori si suddividono in *macropori* (con diametro>8 μ) e *micropori* (con diametro<8 μ); normalmente nei primi è presente aria mentre nei secondi è presente acqua. In particolare, i micropori con diametro>2 μ contengono acqua disponibile per le piante; mentre i micropori con diametro<2 μ contengono acqua non utilizzabile dalle piante poiché l'assorbimento ad opera delle radici non supera la pressione con cui l'acqua è trattenuta nei pori detti anche *capillari*. In concomitanza con le precipitazioni, l'acqua occupa la maggior parte dei pori vuoti, successivamente a causa dell'evapotraspirazione i macropori vengono rioccupati dall'aria circolante nel terreno favorendone così l'aerazione.
- *Temperatura:* condiziona i processi biologici che si svolgono nel terreno, ed il calore posseduto dal terreno deriva dall'irraggiamento solare. Al suo interno le variazioni di temperatura sia giornaliere che annuali sono molto attenuate. La temperatura di un terreno è funzione della sua capacità calorifica o *calore specifico* e dalla sua *conducibilità termica*, il calore specifico è a sua volta influenzato dal contenuto d'acqua, dal colore, dalla struttura, mentre la conducibilità termica è influenzata dalla composizione del terreno. Inoltre, la temperatura del terreno può anche essere influenzata dall'esposizione e dalla copertura vegetale.

10.9.8 Caratteristiche biotiche

Il suolo viene definito come "corpo naturale" quando comincia ad essere colonizzato dagli organismi viventi, i primi colonizzatori sono gli *organismi fotosintetici* come i licheni, che necessitano soltanto di qualche minerale ottenuto dall'alterazione delle rocce, poi man mano lasciano il posto a piante più esigenti dal punto di vista trofico. Successivamente compaiono gli *organismi eteretrofi*, *saprofiti* e *parassiti*, dal punto di vista sistematico questi organismi appartengono sia ai Vertebrati che agli Invertebrati, fino ad arrivare ad alghe, funghi e batteri, ognuno dei quali ha un ruolo ecologico ben definito ed importante per la vita e lo sviluppo del terreno. Globalmente la loro funzione consiste nel riciclo della materia organica principalmente prodotta dalle piante in grado di trasformare le sostanze inorganiche presenti nel suolo in organiche; a chiudere il ciclo delle sostanze a base di N, P, S, ecc. ci sono gli organismi in grado di decomporre la sostanza organica e farla passare nella forma inorganica, nei singoli passaggi della materia organica verso la materia inorganica i differenti organismi ricavano energia per il loro sostentamento; una volta che la sostanza organica è stata trasformata nella forma inorganica viene riutilizzata dalle piante.
Man mano che il suolo comincia ad acquisire i propri caratteri diventa selettivo nei confronti di alcuni *taxon* di organismi a favore di altri. Per ogni gruppo di organismi presenti nel suolo sono importanti i resti degli organismi insieme ai loro residui metabolici, a partire dalle piante. In particolare, la vita dei microorganismi è influenzata da caratteristiche come la qualità della materia organica, la tessitura, la struttura, il pH, l'umidità, temperatura, ecc. All'interno del suolo i microorganismi si concentrano negli strati superficiali e principalmente nella cosiddetta *rizosfera* ove sono notevoli le quantità di residui vegetali. In media la biomassa degli esseri viventi del suolo si aggira intorno ai 660 kg/ha.

10.9.9 Classificazione dei suoli

Per motivi pratici è importante utilizzare un sistema di classificazione dei suoli che permetta di individuarne le caratteristiche fondamentali. Numerosi sono i sistemi di classificazione del suolo, il sistema di classificazione più usato è quello dell'United States Department of Agricolture (USDA) basato sui caratteri del suolo osservabili e rilevabili in campagna che rappresentano la cosiddetta *Soil Taxonomy*.
La classificazione consiste in un sistema gerarchico in cui si parte da categorie di ordine superiore più generiche, fino ad arrivare a categorie inferiori più specifiche e numerose rispetto alle precedenti, considerando però man mano più caratteri dei suoli.
Alla fine del procedimento di classificazione (o determinazione) un suolo viene identificato con un binomio che comprende informazioni sufficienti per risalire al processo pedogenetico che lo ha originato, viene poi inquadrato nel corrispondente regime climatico.
Questo sistema è basato sul riconoscimento di orizzonti diagnostici.

Tab. 10.7 - *Alcuni esempi di integrazioni fra dati fitosociologici e pedologici*

Serie di vegetazione	Substrato geologico	Suoli	Note
Erico arboreae-Querceto cerridis sigmetum	mgM (Arenarie del Macigno)	Xerochrepts lithici, typici e dystrici	Franchi o franco-sabbiosi, poco o non calvarei
	V1 (Depositi fluvio-lacustri del Villafranchiano)	Ustochrepts typici e dystrici	Franchi, poco o non calvarei
		Haplustalfs typici	Su ciottolami e sabbie in zone cacuminali
	Sabbie pleistoceniche	Ustochrepts typici e calcixerollici	Franchi, profondi, poco o non calvarei
		Xerochrepts typici e calcixerollici	Nelle aree in erosione, più calcarei
Roso sempervirentis-Querceto pubescentis quercetosum cerridis sigmetum	Argille plioceniche P3-2	Xerochrepts typici	Argillosi e calcarei
		Xerorthents typici	
	mam (marne della Marnoso-Arenacea)	Xerorthents typici	Franco-limosi e franco-argillosi, ipercalcarei
	mag (marne del Macigno)	Xerorthents typici	Franco-limosi e franco-argillosi, ipercalcarei
Roso sempervirentis - Querceto pubescentis sigmetum	Argille plioceniche P3-2	Xerochrepts typici	Argillosi e calcarei
		Xerorthents typici e lithici	Nelle aree in erosione, CALANCHI
	Alluvioni terrazzate	Xerochrepts typici	Franco-argillosi, neutri, poco o non calcarei
	Depositi fluviali argillosi olocenici	Xerochrepts fluventici	Franchi, subalcalini, spesso ciottolosi e calcarei
Scutellario-Ostryeto carpinifoliae sigmetum	Cn (Calcari)	Xerorthents lithici	Limo-argillosi, ipercalcarei
	ME, MO (calcari marnosi)	Xerochrepts typici	Franchi, equilibrati, poco o non calcarei, non acidi
Coronillo emeri-Querceto cerridis sigmetum	Apparato vulsino	Xerochrepts typici e andici	Non calcarei, subacidi o neutri
		Ustochrepts typici e andici	
		Haplustands typici (10%)	

Fonte: Venanzoni, 2001.

10.9.10 *Indicazioni pratiche per la ricostituzione dei suoli*

Gli interventi di Ingegneria Naturalistica hanno la funzione di consolidamento e recupero, più raramente quello di ricostruire la naturale stratificazione di un suolo (*profilo*).
Negli interventi di consolidamento per fermare fenomeni di soliflusso o reptazione, oppure per stabilizzare una frana o interventi simili si ha già in loco materiale sufficiente a disposizione. Nel caso di recupero di cave, di discariche, di depositi di scorie e inerti vari o di ex cantieri edili, di solito non c'è sufficiente quantità di terreno in loco da poter utilizzare e quindi si rende necessario l'apporto massiccio di materiale alloctono che può differire rispetto alle caratteristiche fisiche e chimiche del suolo che era presente in precedenza nell'area in questione. È buona norma, nel caso di cave di inerti, conservare quanto più possibile il cosiddetto "cappellaccio" per le opere di recupero ambientale. Prima di tutto è consigliabile sempre riprodurre uno strato di suolo di qualche decina di centimetri più spesso di quanto riportato nel progetto, e di migliorare le condizioni edafiche attraverso eventuali opere di fertilizzazione e/o ammendamento e/o correzione del terreno.
Va comunque ricordato che, ove necessarie, debbono essere progettate e realizzate opere di regolazione idrica riguardanti il drenaggio e l'irrigazione. Ad esempio, è utile eseguire delle scoline secondo l'andamento delle isoipse per attenuare il potere erosivo dell'acqua lungo pendii con elevata pendenza e/o lunghezza.
In casi particolari, come il recupero delle cave, sarebbe opportuno conservare il suolo asportato possibilmente in aree circostanti la cava, per un periodo non superiore ad un anno durante il quale periodicamente il terreno dovrebbe essere rivoltato per favorirne l'aerazione mantenendo così integra la componente biotica (**tab.10.7**).

10.10 Scheda d'approfondimento

Nell'impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica, una particolare attenzione viene dedicata allo studio delle condizioni geo-

Tab. 10.8 - *Elenco dei parametri e delle indagini per la sistemazione di versanti soggetti a fenomeni di erosione e/o movimento con tecniche di Ingegneria Naturalistica*

Aspetto	Indagine	Descrizione dell'intervento	Osservazioni
Tipografico - cartografico	Ubicare la zona d'intervento	-	
	Definire l'estensione della zona da investigare	-	L'area ed il perimetro della zona in frana
	Definire la profondità dell'area da investigare	-	
	Scegliere la scala adeguata per l'indagine	-	La scala d'indagine è tanto maggiore (ad esempio 1:10.000; 1:2.000) quanto più dettagliata è l'interazione del progetto con il territorio
Economico	Il tipo di intervento è in funzione della disponibilità economica necessaria per l'indagine in sito o per l'analisi in laboratorio	-	Importanza e costo dell'opera di ripristino in relazione al grado di sicurezza richiesto (e quindi anche al tipo di analisi da effettuarsi).
Geologico - stratigrafico	Rilevamento geologico	Individuare tutte le formazioni (affioramenti) presenti nella zona.	Riconoscere una formazione in campagna comporta la descrizione dei seguenti parametri: • **Litologia**: definire il litotipo presente (marne, calcari, dolomie, arenarie, ecc.) in affioramento tramite l'analisi, quando possibile, di composizione (chimica, mineralogica), tessitura (granulometria, morfometria), struttura (disposizione spaziale degli elementi che compongono una roccia) e, riconoscere il nome della formazione (bibliografia). • **Stratificazione e tettonica**: forma, geometria, spessore e giacitura degli strati (qualora siano presenti) o delle lineazioni tettoniche (faglie, assi di pieghe, strie, ecc.). • **Discontinuità**: le superfici dei giunti e dei piani di strato possono presentarsi con diversa rugosità delle superfici, apertura, alterazione, presenza di acqua. • **Caratteri sedimentologici**: presenza di tracce fossili, grani scheletrici e detritici, ooliti, gradazione; distinzione di unità litostratigrafica e di facies.

(segue)

logiche ed idrogeologiche del sito d'intervento, oltre naturalmente alla scelta e all'impiego delle specie vegetali vive.
Nella **tabella 10.8** si riporta un elenco dei parametri e delle indagini che si ritiene opportuno considerare nella sistemazione dei versanti soggetti a fenomeni d'erosione e/o movimento, con conseguente e preferibile impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica, per la messa in sicurezza dei versanti stessi (Balboni, Uffreduzzi, 2002).

10.11 Ambito d'intervento a scala provinciale nei versanti

La provincia di Terni è interessata, almeno in alcune sue porzioni di territorio, come precedentemente descritto, da un diffuso ed elevato grado di instabilità geomorfologica, relativamente agli ambiti di versante (*dinamica di versante*) e dei corsi d'acqua (*dinamica fluviale*).
Se differenti possono essere le tipologie del

***segue tab. 10.8** - Elenco dei parametri e delle indagini per la sistemazione di versanti soggetti a fenomeni di erosione e/o movimento con tecniche di Ingegneria Naturalistica*

Aspetto	Indagine	Descrizione dell'intervento	Osservazioni
Geologico - stratigrafico		Cartografare gli affioramenti	
		Definire i rapporti reciproci fra gli strati	Dall'analisi in pianta e soprattutto in sezione dei rapporti tra i diversi strati si possono evidenziare casi distinti: • **reggipoggio**: gli strati immergono nel verso opposto a quello in cui pende il versante; il pendio in questo caso è tendenzialmente stabile; • **franapoggio**: gli strati immergono nello stesso verso cui pende il versante; Si possono avere due casi: a) inclinazione degli strati superiore a quella del pendio; b) inclinazione degli strati inferiore a quella del pendio. Soprattutto in quest'ultimo caso le giaciture degli strati favoriscono movimenti franosi lungo il versante.
Idrogeologico	Analisi sugli acquiferi	Sono importanti per individuare l'andamento e le caratteristiche delle falde idriche sotterranee. È necessario svolgere una serie di analisi che ci permettono di conoscere il comportamento della porzione di terreno direttamente coinvolta nel dissesto e, quindi individuare le eventuali infiltrazioni di acque superficiali nel sottosuolo, responsabili del movimento	Sui terreni e sulle rocce è necessario individuare dei parametri, che possono essere di seguito elencati: • **porosità (K)**:è la capacità di una roccia di immagazzinare ed eventualmente cedere acqua; • **permeabilità (Q)**: proprietà delle rocce di lasciarsi attraversare dall'acqua per effetto di un carico idraulico; • **velocità di filtrazione delle acque di falda (v = Ki)** è il prodotto tra il coefficiente di permeabilità e il gradiente idraulico; • **gradiente idraulico (i)**: perdita di carico per distanza unitaria del flusso; • **portata di una falda (Q = KAi)**: è il prodotto tra il coefficiente di permeabilità, la sezione filtrante ed il gradiente idraulico.
	Captazione delle acque di una falda	La captazione delle acque può avvenire, tramite drenaggi orizzontali	**Trincee drenanti** (opere trasversali al versante): • i materassi da emungere devono essere a quota superiore a quella del luogo d'uso delle acque estratte, per sfruttare l'allontanamento a gravità delle stesse. **Gallerie drenanti** (opere parallele alla direzione di massima pendenza del pendio): • drenano in genere le falde freatiche nei depositi ai piedi dei rilievi. **Perfori orizzontali**: (opere poste in serie od a raggiera per permettere il drenaggio dei terreni).

(segue)

segue tab. 10.8 *- Elenco dei parametri e delle indagini per la sistemazione di versanti soggetti a fenomeni di erosione e/o movimento con tecniche di Ingegneria Naturalistica*

Aspetto	**Indagine**	**Descrizione dell'intervento**	**Osservazioni**
Geotecnico	Sondaggi	Queste indagini si usano principalmente per riconoscere la successione e la natura dei terreni (stratigrafia), e per permettere il recupero delle carote di terreno e di campioni rimaneggiati o indisturbati. Nel corso dell'esecuzione del sondaggio in foro, possono essere eseguite *prove in situ* di vario tipo e possono (Spt in foro, ecc.) essere installate apparecchiature di misura quali piezometri, assestimetri, inclinometri, ecc.	
	Penetrometrie	Le indagini vengono eseguite con due tipi di penetrometri	**Prove penetrometriche dinamiche (SPT)**: si registrano il numero di colpi per ottenere un avanzamento prefissato nel terreno con un utensile costituito da un campionatore standard. **Prove penetrometriche statiche (CPT)**: si infigge nel terreno una punta con avanzamento controllato, misurando in superficie la pressione esercitata sulle aste dello strumento e sulla punta.
	Altre prove in sito		**Prove scissometriche (Field Vane test)**: un utensile con quattro alette poste a croce viene infisso nel terreno e viene misurato il momento torcente corrispondente; è una prova generalmente impiegata in terreni argillosi a bassa consistenza ricavandone la resistenza al taglio senza drenaggio c_u. **Prove dilatometriche (DTM)**: l'utensile è dotato di una membrana che viene fatta dilatare, misurando la pressione corrispondente all'inizio del moto della membrana e quello corrispondente ad uno spostamento prefissato. **Prove pressiometriche**: viene inserita ad una certa profondità una sonda cilindrica che viene fatta dilatare gradualmente, misurando nel contempo le pressioni applicate e le deformazioni corrispondenti.

(segue)

segue tab. 10.8 *- Elenco dei parametri e delle indagini per la sistemazione di versanti soggetti a fenomeni di erosione e/o movimento con tecniche di Ingegneria Naturalistica*

Aspetto	Indagine	Descrizione dell'intervento	Osservazioni
Geotecnico	Analisi di laboratorio	Vengono eseguite sui campioni di terreno indisturbati, prelevati a varie profondità nel corso dei sondaggi	**Analisi granulometrica**: • serve per determinare la dimensione delle particelle che compongono un terreno e per stabilire le percentuali in peso delle varie frazioni entro limiti prefissati. L'analisi si esegue tramite setacciatura e/o aerometria. **Limiti di Atterberg**: • è il valore del contenuto d'acqua corrispondente al passaggio da uno stato fisico ad un altro (solido, semisolido, plastico, liquido). **Coesione**: • è quella forza capillare esistente tra i granuli in un terreno. **Angolo d'attrito interno (φ)**: • angolo tra l'ascissa e la tangente alla curva rappresentante la relazione tra resistenza al taglio e sforzi normali agenti all'interno del terreno; e dovuta all'incastro e alla resistenza allo scivolamento tra i granuli. **Resistenza al taglio delle terre**: la massima resistenza di un suolo a sforzi di taglio: • questo parametro viene misurato tramite **la prova triassiale**: si sottopone un provino cilindrico di terreno a rottura in diverse condizioni di drenaggio. Queste diverse condizioni di prova corrispondono a delle situazioni reali: • La **compressione per carico** che si ottiene dalla seconda fase di prova corrisponde allo stato di sollecitazione che si ha nel terreno di fondazione di un opera. • La **compressione per scarico** corrisponde a quello che si ha nel terreno che spinge un muro di sostegno (spinta attiva). L'estensione per scarico corrisponde allo stato di sollecitazione nel terreno subito al di sotto del fondo di uno scavo. L'estensione in carico a quello che si ha nel terreno al piede di una paratia (spinta passiva). **Prove di taglio diretto**: la rottura viene raggiunta nel provino provocando il taglio secondo un piano prestabilito, con l'apparecchio di Casagrande.
Geofisico	Indagine geoelettrica		Ci permettono di ricavare la resistività delle rocce, in funzione della porosità, del contenuto d'acqua, della quantità di sali disciolti che ci consente di individuare in modo indiretto la litologia.
	Indagini sismiche		La velocità di propagazione delle onde sismiche dipende dalla natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fratturazione, la porosità, il contenuto in acqua.

(segue)

***segue tab. 10.8** - Elenco dei parametri e delle indagini per la sistemazione di versanti soggetti a fenomeni di erosione e/o movimento con tecniche di Ingegneria Naturalistica*

Aspetto	Indagine	Descrizione dell'intervento	Osservazioni
Geomorfologico	Classificazione della frana o del movimento di versante	La classificazione può avvenire secondo il tipo di movimento e il tipo di materiale interessato (cl. Di Vernes o altri)	
	Dimensioni e caratteristiche geometriche del corpo di frana	Estensione areale del dissesto e dell'area potenzialmente coinvolta dalla sua evoluzione	
		Lunghezza della zona di distacco e della zona di accumulo (distanza dal coronamento al punto inferiore dell'unghia)	
		Larghezza intesa come l'andamento della distanza tra i due fianchi, per tutta la lunghezza.	
		Volumi di terreno franati	
		Profondità ed andamento della/e superficie/i di rottura	

Fonte: Balboni, Uffreduzzi, 2002.

dissesto e le conseguenze della sua presenza, alla naturale fragilità di un'area in relazione alle sue caratteristiche geologiche e geomorfologiche, si unisce sempre la presenza dell'attività umana che spesso non tenendo in giusta considerazione le dinamiche naturali del territorio, opera nella sua tendenza all'urbanizzazione in contrasto con esse costituendo l'elemento d'innesco della condizione di dissesto idrogeologico.
Per *dissesto di versante* si intende generalmente il movimento, più o meno repentino, di masse di terreno di volume modesto od ingente, la cui superficie di movimento è localizzata in prossimità della superficie od in profondità.
Tali movimenti franosi che interessano i pendii non sono di facile schematizzazione in quanto la casistica è molto ampia, sia per quanto riguarda la loro genesi, sia per quanto concerne la loro evoluzione; esistono vari tipi di classificazione in funzione degli aspetti considerati quali le condizioni geologiche, la genesi, la dinamica evolutiva, ecc.
Inoltre, lo stato di attività (*attivo*, *quiescente* o *inattivo*) di un movimento franoso in relazione alla persistenza o meno dell'agente morfogenetico che lo ha determinato o alla presenza di indizi di movimento è un ulteriore elemento di caratterizzazione del dissesto.
Le condizioni geologiche rientrano in quelli che vengono chiamati correntemente *fattori passivi* o *predisponenti* e comprendono la composizione (tipo di materiale e coesione), la struttura (rocce massive o stratificate), il grado di fessurazione e di fratturazione, l'assetto strutturale-giaciturale del corpo geologico (legato agli *stress* tettonici regionali agenti nel territorio ed al tipo di sedimentazione).
Le condizioni morfo-climatiche rientrano, invece, all'interno di quelli che vengono chiamati *fattori attivi o scatenanti* poiché considerati come agenti innescanti il movimento, particolare incidenza rivestono la densità e la frequenza di piovosità elevata, se a queste si aggiunge la possibilità di sollecitazioni esterne come sovraccarichi legati alle attività antropiche od azioni sismiche, è facile intuire come condizioni potenzialmente sfavorevoli possano trasformarsi in dissesti di versanti.
Nel territorio provinciale è possibile, in base a quanto descritto nei paragrafi precedenti, definire alcune "situazioni geologiche e geomorfologiche tipo" relativamente all'am-

bito di versante, nelle quali l'utilizzo di tecniche di Ingegneria Naturalistica permette sia di modificare in senso favorevole alla stabilità di alcuni dei fattori predisponenti, sia di ridurre l'effetto dei fattori scatenanti, determinando in genere una maggiore stabilità dei versanti.
Tali situazioni-tipo, possono essere schematicamente riassuntenei punti che seguono.

- *Pendio ad acclività media o medio-alta, in litotipi granulari, più o meno fini, sciolti o scarsamente coesivi, su substrato competente.*
  È la condizione in cui si trovano alcune aree collinari o basso montane; presentano spessori variabili entro i 5/6 metri di terreni granulari, più o meno fini, sciolti o scarsamente coesivi, poggianti su substrato competente (di natura litoide od argille fortemente consolidate), nei primi metri può essere presente anche uno spessore di terreno di alterazione o copertura (in prossimità di impluvi morfologici) con caratteristiche geomeccaniche peggiori, inoltre può essere presente una filtrazione idrica epidermica legata ad eventi piovosi.
  I dissesti sono spesso dovuti a scivolamenti lenti della coltre di copertura o del terreno stesso, con una o più superfici di scollamento ubicate nei primi metri e subparallele al pendio, il movimento è testimoniato dalla presenza di fratture a trazione e scarpatine metriche di distacco nel lato di monte, avvallamenti e gibbosità più o meno pronunciate nel corpo di frana ed un accumulo nel lato di valle.
  I fattori che determinano la rottura dell'equilibrio naturale e quindi il movimento, oltre alle condizioni geomorfologiche, possono essere ricercati generalmente nella non regimentazione delle acque superficiali che ruscellano in maniera diffusa o si canalizzano spontaneamente lungo la linea di massima pendenza, nell'abbattimento delle alberature, nelle arature selvagge e nella incauta realizzazione di movimento terre per la realizzazione di opere.
- *Pendio a varia acclività, in litotipi granulari, più o meno fini, sciolti e/o coesivi, di discreto spessore.*
  È la condizione in cui si trovano vaste aree collinari; presentano spessori di qualche decina di metri in terreni granulari, più o meno fini, sciolti o coesivi, nei primi metri può essere presente anche uno spessore di terreno di alterazione o copertura (in prossimità di impluvi morfologici) con caratteristiche geomeccaniche peggiori.
  Dal punto di vista idrogeologico possono essere presenti, oltre ad una filtrazione idrica epidermica legata ad eventi piovosi, più falde acquifere poste a varie profondità anche in condizioni di acquifero semilibero.
  I dissesti sono dovuti a movimenti con cinematica complessa, più o meno lenti del terreno con una superficie di scivolamento principale ad andamento circolare o cilindrico, ubicata in profondità e superfici di scivolamento secondarie più superficiali.
  Il movimento, diverso per velocità e direzione, è testimoniato dalla netta presenza, di una zona di distacco posta nel lato di monte, caratterizzata da fratture a trazione e una o più nicchie di distacco, di una zona di accumulo posta nel lato centrale e di valle, con avvallamenti e gibbosità più o meno pronunciate, un corpo di frana ed un accumulo terminale ad unghia.
  I fattori che determinano la rottura dell'equilibrio naturale, oltre a quelli secondari quali il ruscellamento diffuso delle acque, l'effetto conservativo delle alberature, sono da ricercarsi nelle caratteristiche geomeccaniche dei terreni in relazione alle condizioni geomorfologiche del pendio.
  In particolare, l'esistenza nel pendio di una condizione di equilibrio precario nel rapporto *forza agente/forza resistente*, può determinare per il versante una condizione di instabilità incipiente che, turbata da un qualsiasi evento (pioggia e filtrazione, oscillazione della falda, azione sismica, movimenti antropici), determina la condizione di instabilità e l'innesco del movimento.
- *Pendio caratterizzato da tratti subverticali in litotipi competenti poggianti su litotipi granulari, più o meno fini, sciolti o scarsamente coesivi.*
  È la condizione in cui si trovano alcune limitate aree caratterizzate in affioramento da piroclastiti, travertini o conglomerati cementati oppure arenarie o calcari (*litotipi competenti*), per spessori di qualche metro sino a decine di metri, poggianti su argille, sabbie o ghiaie (*litotipi granulari*).
  Dal punto di vista idrogeologico possono essere presenti, oltre ad una filtrazione idrica epidermica legata ad eventi piovosi, anche una falda libera posta al contatto tra le due litologie.
  I dissesti sono dovuti a movimenti con cinematica complessa di scorrimento, ribaltamento e crollo, più o meno rapidi, dei litotipi competenti con superfici di scivolamento basale posta al contatto e dovuta all'azione erosiva e di deformazione plastica del terreno granulare basale.
  Il movimento diverso per rapidità e meccanismo è testimoniato dalla presenza di fratture di distacco che isolano porzioni di terreno competente che scivolano con movimento di ribaltamento o crollo; a valle sono presenti zone di accumulo del materiale crollato.
  I fattori che determinano la rottura dell'equilibrio naturale sono legati prevalentemente all'azione erosiva sui terreni basali dovuti all'azione delle acque meteoriche e di ruscellamento, a fenomeni di rigonfiamento ed espansione degli stessi, oltre alla circolazione di acque ipodermiche.

Bibliografia

AA.VV., 1993
Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica, Regione Emilia Romagna - Regione Veneto.

AA.VV., 1994.
Corso di formazione professionale in Ingegneria Naturalistica, atti, Regione Veneto - Dipartimento Foreste, Belluno.

AA.VV., 2000a
Manuale di metodologie e tecniche a basso impatto in materia di difesa del suolo. Studio di nuove metodologie ambientali in materia di difesa del suolo e miglioramento ambientale, Regione Marche - WWF, Edizioni Edicomp, allegato n. 10, settembre.

AA.VV., 2000b
Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1: Processi territoriali e criteri metodologici, collana "Fiumi e Territorio", Regione Toscana, aprile.

Carbonari A., Mezzanotte M., 1993
Tecniche naturalistiche nella sistemazione del territorio, Provincia Autonoma di Trento - Servizio Ripristino e Valorizzazione Ambientale.

Cornelini P., Zoccoli G., 1995
Interventi di Ingegneria Naturalistica nei lavori ferroviari, in *Tecniche di rinaturazione e di Ingegneria Naturalistica*, a cura di G. Sauli e S. Siben, Patron Editore.

De Colle C., Mocchiutti A., 2000
Opere di Ingegneria Naturalistica per prevenire le calamità naturali, in "Rassegna tecnica", n. 3.

Florineth F., 1995
Consolidamento di frane ed erosioni in zone montane, in *Tecniche di rinaturazione e di Ingegneria Naturalistica*, a cura di G. Sauli e S. Siben, Patron Editore, Bologna.

Galeotti L., 2000
L'Ingegneria Naturalistica nella sistemazione dei versanti, in *Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1: Processi territoriali e criteri metodologici*, collana "Fiumi e Territorio", Regione Toscana, aprile.

Hofmann A., 1963
La sistemazione idraulico-forestale dei bacini montani, UTET, Torino.

Hoffmann J., 1992
Dimostrazioni sull'utilità pratica delle tecniche costruttive dell'Ingegneria Naturalistica, in *Tecniche di rinaturazione e d'Ingegneria Naturalistica*, a cura di G. Sauli e S.Siben, Patron Editore, Bologna.

Luchetta A., 1994
Ingegneria Naturalistica: origine, evoluzione e prospettive, atti del "Corso di formazione professionale in Ingegneria Naturalistica", Sospirolo (BL), aprile.

Ministero dell'Ambiente, 1997
Linee guida per capitolati speciali per interventi di Ingegneria Naturalistica e lavori di opere a verde, Roma, settembre.

Panizza M., 1992
Geomorfologia, Pitagora Editrice, Bologna.

Panizza M., 1987
Geomorphological hazard assessment and the analysis of Geomorphological risk, in "Intern. Geomorph.", n. 1, Wiley & Sons, London.

Puglisi S., 2000a
Il controllo dell'erosione di versante con le tecniche dell'Ingegneria Naturalistica, in "L'Acqua", numero speciale, n. 3.

Puglisi S., 2000b
Recupero delle aree in frana e loro destinazione a verde, in "Italus Hortus", vol. 7, numero speciale, aprile.

Schiechtl H.M., 1990
Esempi concreti di consolidamento di sponde e di scarpate fluviali, in "Acer", 1990.

Schiechtl H.M., 1995
Esempi significativi di consolidamento di scarpate stradali mediante l'Ingegneria Naturalistica, in *Tecniche di rinaturazione e di Ingegneria Naturalistica*, a cura di G. Sauli e S. Siben, Patron Editore, Bologna.